

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NFT HİDROPONİK YÖNTEMİ KULLANARAK IOT TABANLI
AKILLI TARIM UYGULAMASI

TOLGA DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ İHSAN ÇİÇEK

OCAK 2026

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NFT HİDROPONİK YÖNTEMİ KULLANARAK IOT
TABANLI AKILLI TARIM UYGULAMASI

TOLGA DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ İHSAN ÇİÇEK

OCAK 2026

T.C.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

IoT-BASED SMART FARMING APPLICATION USING
NFT HYDROPONICS METHOD

TOLGA DEMİR

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

ADVISOR: ASSIST. PROF. DR. İHSAN ÇİÇEK

JANUARY 2026

YÜKSEKLİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 20/01/2026 tarih ve 2026/05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/01/2026 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Tolga DEMİR'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi İhsan ÇİÇEK

ÜYE

: Doç. Dr. Serdar Süer ERDEM

ÜYE

: Doç. Dr. Salih BAYAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kapalı ortam koşullarında çalıştırılmak üzere Besin Film Tekniği (NFT – Nutrient Film Technique) kullanan, IoT tabanlı akıllı bir hidroponik sistemin tasarımı, gerçekleştirilmesi ve deneysel doğrulaması ele alınmıştır. Geleneksel topraksız tarım uygulamalarında karşılaşılan su ve besin israfı, çevresel parametrelerin yetersiz kontrolü ve işletim sürekliliği problemlerine çözüm sunmak amacıyla, gömülü sistemler ve nesnelerin interneti teknolojilerini temel alan bütüncül bir sistem mimarisi geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistemin çekirdek yapısı, ESP32 tabanlı bir gömülü kontrol birimi üzerine inşa edilmiştir. pH, TDS/EC, besin çözeltisi sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve nemi, ışık şiddeti, akış hızı ve tank seviyesi gibi kritik parametreler çoklu sensör mimarisi ile gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Analog sensörlerden yüksek çözünürlüklü ve kararlı ölçüm elde edebilmek amacıyla ADS1115 harici ADC modülü kullanılmış; sensör doğruluğu iki noktalı kalibrasyon yöntemleriyle artırılmıştır. Toplanan sensör verileri MQTT protokolü aracılığıyla sunucu katmanına aktarılmış; veri işleme, kayıt ve görselleştirme işlemleri Node-RED, InfluxDB ve Grafana altyapıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sistemin uzaktan izlenmesi ve manuel kontrolü için Flutter tabanlı bir mobil uygulama geliştirilmiştir.

Sistem yazılımı, manuel, otomatik ve kalibrasyon modlarını içeren Sonlu Durum Makinesi (FSM) tabanlı bir kontrol mimarisi ile yapılandırılmıştır. Otomatik modda, sensör verilerine dayalı olarak besin dozajı, pH ayarlaması, aydınlatma ve iklimlendirme işlemleri yerel karar mekanizmaları ile güvenli biçimde yürütülmüş; kontrol çatışmalarını önlemeye yönelik yazılımsal kilit ve emniyet senaryoları uygulanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında sensör kalibrasyonu, histerezis davranışı, sirkülasyon arızası algılama, ağ kopukluğu ve uzun dönemli veri kararlılığı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin kararlı, güvenilir ve ağ bağlantısından bağımsız olarak yerel kontrol fonksiyonlarını sürdürebilen bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, kontrollü ortam tarımı uygulamaları için ölçeklenebilir ve endüstriyel düzeyde uygulanabilir bir IoT tabanlı hidroponik sistem çözümü ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kapalı Ortam Tarımı, IoT Tabanlı Hidroponik Sistem, Sensör Tabanlı İzleme, MQTT Haberleşme Protokolü, Node-RED, InfluxDB ve Grafana

ABSTRACT

In this thesis study, the design, implementation, and experimental validation of an IoT-based smart hydroponic system employing the Nutrient Film Technique (NFT) and intended to operate under controlled indoor conditions are presented. In order to address challenges commonly encountered in conventional soilless agriculture—such as water and nutrient wastage, insufficient control of environmental parameters, and operational continuity issues—a holistic system architecture based on embedded systems and Internet of Things technologies has been developed.

The core structure of the proposed system is built around an ESP32-based embedded control unit. Critical parameters including pH, TDS/EC, nutrient solution temperature, ambient temperature and humidity, light intensity, flow rate, and tank level are monitored in real time using a multi-sensor architecture. To obtain high-resolution and stable measurements from analog sensors, an external ADS1115 analog-to-digital converter is employed, and sensor accuracy is enhanced through two-point calibration procedures. The acquired sensor data are transmitted to the server layer via the MQTT protocol, where data processing, logging, and visualization are carried out using Node-RED, InfluxDB, and Grafana platforms. In addition, a Flutter-based mobile application has been developed to enable remote monitoring and manual control of the system.

The system software is structured using a Finite State Machine (FSM)-based control architecture comprising manual, automatic, and calibration modes. In automatic mode, nutrient dosing, pH adjustment, lighting, and climate control operations are executed safely through local decision-making mechanisms, while software-based interlocks and safety scenarios are implemented to prevent control conflicts. Experimental evaluations include sensor calibration validation, hysteresis behavior analysis, circulation failure detection, network disconnection scenarios, and long-term data stability tests. The results demonstrate that the proposed system operates in a stable and reliable manner and is capable of maintaining local control functionality independently of network connectivity. In this respect, the study presents a scalable and industrially applicable IoT-based hydroponic system solution for controlled environment agriculture.

Keywords: Controlled Environment Agriculture, Iot-Based Hydroponic System, Sensor-Based Monitoring, MQTT Communication Protocol, Node-RED, Influxdb - Grafana

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasının planlanması, yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde akademik bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve yapıcı geri bildirimleriyle katkı sağlayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İhsan Çiçek hocama teşekkür ederim. Tez süresince sağladığı rehberlik, çalışmanın bilimsel ve sistematik bir çerçevede ilerlemesine önemli katkı sunmuştur.

Çalışma sürecinde zaman zaman destek sağlayan kardeşim Mustafa Fehmi Demir’e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini sürdüren, her aşamada yanımda olan anneme ve babama teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasına doğrudan veya dolaylı katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR/ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı ve Motivasyon	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Katkıları	3
1.4. Tezin Organizasyonu	4
2. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Topraksız Tarım ve Hidroponik Sistemler	5
2.1.1. Topraksız Tarım Yaklaşımlarına Genel Bakış	6
2.1.2. Hidroponik Sistem Tipleri ve Sınıflandırma	7
2.1.3. NFT Tekniği ve Bu Tez Bağlamında Tercih Gerekçesi	8
2.2. Kapalı Ortam NFT Kontrol Parametreleri	9
2.2.1. Ortam Koşulları: Sıcaklık, Bağlı Nem ve Işık Şiddeti	10
2.2.2. Aydınlatma Gereksinimleri: Fotoperiyot ve LED Yaklaşımı	11
2.2.3. Besin Çözeltisi Parametreleri: pH, EC/TDS ve Sıcaklık	11
2.2.4. Sistem Bütünlüğü ve Emniyet Parametreleri: Seviye ve Akış	12
2.3. Akıllı Tarım, IoT ve Haberleşme Yaklaşımları	13
2.3.1. IoT Tabanlı Mimari Yaklaşımlar	13
2.3.2. Haberleşme Yaklaşımları ve MQTT'nin Konumlandırılması	14
2.3.3. IoT Tabanlı Veri Toplama ve Görselleştirme	15
2.3.4. IoT Tabanlı Hidroponik Sistemlerde Kontrol Yaklaşımları	16
2.4. IoT Tabanlı Hidroponik Sistemler Literatürü	16
2.5. Literatürdeki Boşluklar ve Tezin Katkısı	17
3. GENEL SİSTEM MİMARİSİ	19
3.1. Sisteme Genel Bakış	19
3.2. Algılama ve Aktüatör Katmanı	21
3.2.1. Besin Çözeltisi ile İlişkili Sensörler	22
3.2.1.1. pH Sensörü	22
3.2.1.2. TDS (Toplam Çözünmüş Madde) Sensörü	23
3.2.1.3. Besin Çözeltisi Sıcaklık Sensörü	24
3.2.2. Ortam Koşullarına İlişkin Sensörler	24
3.2.2.1. Ortam Sıcaklık ve Bağlı Nem Sensörü (AHT10)	25
3.2.2.2. Işık Şiddeti Sensörü (BH1750)	25
3.2.3. Emniyet Amaçlı Sensörler: Akış ve Seviye İzleme	26
3.2.3.1. Akış Sensörü (YF-S201)	26
3.2.3.2. Seviye Sensörü (HC-SR04)	27
3.2.4. Aktüatör Katmanı	27
3.2.4.1. Besin Çözeltisi Sirkülasyon Pompası	28

3.2.4.2. Dozaj Pompaları (Besin ve pH Düzenleme)	29
3.2.4.3. Ortam İklim Kontrol Fanları (Giriş / Egzoz)	29
3.2.4.4. Bitki Büyüme Aydınlatma Sistemi	30
3.2.5. Yardımcı Donanım Bileşenleri	31
3.2.5.1. Görüntüleme Birimi (LCD Ekran)	31
3.2.5.2. Gerçek Zamanlı Saat (RTC) Modülü	32
3.2.5.3. Güç Adaptörleri ve Besleme Altyapısı	32
3.2.5.4. Aktüatör Sürücü Birimi (8 Kanallı Röle Modülü)	33
3.3. Gömülü Kontrol Katmanı	34
3.3.1. Gömülü Kontrol Biriminin Rolü ve Donanım Seçimi	34
3.3.2. Çalışma Modları ve FSM Yönetimi	36
3.3.3. Kural Tabanlı Kontrol Algoritması ve Karar Mantığı	37
3.3.4. Emniyet Kilitleri ve Hiyerarşik Öncelik Mimarisi	39
3.4. Haberleşme Katmanı	40
3.4.1. Haberleşme Gereksinimleri	41
3.4.2. MQTT Tabanlı Haberleşme Yapısı	42
3.4.2.1. Veri Paketleme ve Konu (Topic) Hiyerarşisi	42
3.4.2.2. Hizmet Kalitesi (QoS) Yönetimi	43
3.4.3. Node-RED Tabanlı Entegrasyon Katmanı	43
3.5. Kullanıcı Etkileşim Katmanı	45
3.5.1. Sunucu ve Dashboard Tabanlı İzleme	45
3.5.2. Mobil Uygulama Üzerinden Erişim (Flutter)	46
3.6. Veri Yönetimi ve Depolama Stratejisi	47
3.7. Katmanlar Arası Veri ve Kontrol Akışı	48
3.7.1. Sensörden Kullanıcıya Veri Akışı (Uplink)	49
3.7.2. Kullanıcıdan Aktüatöre Komut Akışı (Downlink)	49
3.7.3. Normal İşletim ve Emniyet Senaryosu Ayrımı	50
3.7.4. Mimari Bütünlüğün Değerlendirilmesi	50
4. SİSTEM GERÇEKLENMESİ VE UYGULAMA	52
4.1. Sistem Gerçekleme Metodolojisi ve Geliştirme Ortamı	52
4.2. Donanım Gerçeklemesi ve Fiziksel Kurulum	53
4.2.1. Mekanik Yerleşim ve Fiziksel Kurulum	53
4.2.2. Elektronik Donanım Mimarisi ve Elektriksel Entegrasyon	56
4.3. Gömülü Yazılım Mimarisi (ESP32 Firmware)	61
4.3.1. Modüler Kod Organizasyonu ve Dosya Yapısı	63
4.3.2. Ana Döngü ve Bloklamasız (Non-blocking) Zamanlama	64
4.3.2.1. Haberleşme Yığını Yönetimi (client.loop)	64
4.3.2.2. Veri Paketleme ve Yayınlama Rutini	64
4.3.2.3. Emniyet ve Alarm Denetim Rutini	64
4.3.3. FSM (Sonlu Durum Makinesi) Tabanlı Kontrol Yapısı	66
4.3.3.1. Otomatik Mod (MODE_AUTO)	67
4.3.3.2. Manuel Mod (MODE_MANUAL)	69
4.3.3.3. Kalibrasyon Modu (MODE_CALIBRATION)	70
4.4. Haberleşme Katmanı ve Veri Protokolü	71
4.4.1. MQTT Protokolü ve Yayınla/Abone Ol Mimarisi	71
4.4.2. Topic (Konu Başlığı) Hiyerarşisi ve API Sözleşmesi	73
4.4.3. Veri Serileştirme (JSON) ve Payload Yapısı	74
4.4.4. Bağlantı Güvenilirliği ve QoS Politikaları	75
4.5. Sunucu Tarafı Uygulama ve Hizmetlerin Kurulumu	76
4.5.1. MQTT Broker (Mosquitto) Kurulumu ve Yapılandırması	77

4.5.2. Node-RED Akış Mimarisi ve Sunucu Taraflı Veri İşleme	78
4.5.3. Veritabanı Entegrasyonu ve Zaman Serisi Kaydı (InfluxDB)	81
4.5.4. Veri Görselleştirme ve Kontrol Arayüzleri	82
4.6. Mobil Uygulama Mimarisi (Flutter & Dart)	84
4.6.1. Uygulama Mimarisi ve Durum Yönetimi (State Management)	84
4.6.2. Haberleşme Mantığı ve Veri Akışı	85
4.6.3. Kullanıcı Arayüzü (UI) Tasarımı	86
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA	87
5.1. Deneysel Kurulum ve Sistem Başlatma Süreci	87
5.2. Sensör Ölçüm Performansı ve Kalibrasyon Sonuçları	88
5.2.1. pH Sensörü Kalibrasyon Süreci ve Doğrulama Testi	88
5.2.2. Ortam İklimlendirme Kontrolü ve Histerezis Testi	90
5.2.3. Sirkülasyon Arızası ve Akış Güvenlik Testi	93
5.3. FSM Tabanlı Kontrol Davranışının Değerlendirilmesi	95
5.3.1. Çalışma Modları Arası Geçiş ve Durum Koruma	95
5.3.2. Manuel Kontrol ve Eylem-Doğrulama Testi	96
5.4. Uzaktan İzleme, Veri Kaydı ve Ağ Performansı Testleri	97
5.4.1. Node-RED ile Gerçek Zamanlı Sistem İzleme	97
5.4.2. Grafana ve InfluxDB ile Uzun Dönem Veri Analizi	98
5.4.3. Ağ Kopukluğu ve Veri Sürekliliği Senaryosu	101
6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR	104
6.1. Sonuçlar	104
6.2. Literatür ile Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Özgün Değer	105
6.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	106
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	112
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

%RH	: Bağıl nem (Relative Humidity)
±	: Tolerans aralığı
Δ	: Değişim miktarı
°C	: Santigrat sıcaklık birimi
A	: Amper
Hz	: Hertz (frekans birimi)
L/min	: Litre/dakika (debi birimi)
lx	: Lux (ışık şiddeti birimi)
ms	: Milisaniye
V	: Volt
ADC	: Analog-to-Digital Converter
API	: Application Programming Interface
BLDC	: Brushless Direct Current
CLI	: Command Line Interface
CSV	: Comma-Separated Values
EC	: Electrical Conductivity
GPIO	: General Purpose Input/Output
HMI	: Human–Machine Interface
HTTP	: Hypertext Transfer Protocol:
I ² C	: Inter-Integrated Circuit
IoT	: Internet of Things
JSON	: JavaScript Object Notation
LCD	: Liquid Crystal Display
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport
NFT	: Nutrient Film Technique
pH	: Potential of Hydrogen
QoS	: Quality of Service
RTC	: Real-Time Clock
TDS	: Total Dissolved Solids
UI	: User Interface
Wi-Fi	: Wireless Fidelity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Yaygın hidroponik sistem türlerinin şematik gösterimi [14].	8
Şekil 3.1: IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistemin katmanlı mimari yapısı.	20
Şekil 3.2: Analog pH probu ve modül devresi	22
Şekil 3.3: TDS probu ve modül devresi.	23
Şekil 3.4: DS18B20 sıcaklık sensörü.	24
Şekil 3.5: AHT10 sıcaklık ve bağıl nem sensörü.	25
Şekil 3.6: BH1750 ışık şiddeti sensörü.	26
Şekil 3.7: Türbin tipi akış sensörü.	26
Şekil 3.8: Ultrasonik seviye sensörü.	27
Şekil 3.9: BLDC dalgiç sirkülasyon pompası.	28
Şekil 3.10: Peristaltik dozaj pompaları.	29
Şekil 3.11: Kabin içi DC fanlar.	30
Şekil 3.12: Tam spektrumlu bitki yetiştirme LED şeritleri.	31
Şekil 3.13: I ² C tabanlı LCD gösterge paneli.	31
Şekil 3.14: DS3231 gerçek zamanlı saat (RTC) modülü	32
Şekil 3.15: Sistem güç kaynakları a) 12V DC b) 5V DC.	33
Şekil 3.16: 8 kanallı röle kartı.	33
Şekil 3.17: ESP32 NodeMCU geliştirme kartı	35
Şekil 3.18: FSM tabanlı çalışma modları ve mod geçişleri.	36
Şekil 3.19: Emniyet, manuel ve otomatik modlar arasındaki hiyerarşik karar akışı.	40
Şekil 4.1: Mekanik kurulum: (a) Kabin dış görünümü, (b) Kabin içi yerleşim.	54
Şekil 4.2: NFT kanallarının kabin içi yerleşimi.	54
Şekil 4.3: Besin çözeltisi rezervuarı ve sirkülasyon hattı.	55
Şekil 4.4: Kabin içi hava akış ve fan yerleşimi [3].	56
Şekil 4.5: Sensör ve aktüatörler için yıldız bağlantı topolojisi.	57
Şekil 4.6: ESP32 tabanlı kontrol birimi ve çevresel birimlerin açık devre şeması.	58
Şekil 4.7: Elektriksel montaj panoları: (a) Güç, (b) Kontrol.	59
Şekil 4.8: Gömülü sistem kontrol döngüsü ve veri akışı.	62
Şekil 4.9: Bloklamasız zamanlama yapısı.	65
Şekil 4.10: FSM tabanlı kontrol mantığı.	67
Şekil 4.11: Otomatik mod karar akış diyagramı.	68
Şekil 4.12: Manuel mod ve uzaktan komut işleme akışı.	69
Şekil 4.13: Kalibrasyon modu ve emniyet kilidi akışı.	70
Şekil 4.14: MQTT tabanlı yayınla/abone ol haberleşme mimarisi.	72
Şekil 4.15: MQTT üzerinden yayınlanan örnek JSON telemetri paketi.	75
Şekil 4.16: Mosquitto yapılandırma dosyası temel parametreleri.	77
Şekil 4.17: Node-RED ve MQTT broker bağlantı doğrulaması.	78
Şekil 4.18: Node-RED sunucu taraflı genel akış mimarisi.	79
Şekil 4.19: Dashboard izleme akışı.	79
Şekil 4.20: Aktüatör kontrol (switch) akışı.	80
Şekil 4.21: CSV günlük veri kayıt akışı.	81
Şekil 4.22: InfluxDB zaman serisi kayıt akışı.	81
Şekil 4.23: Node-RED tabanlı izleme ve kontrol paneli.	83
Şekil 4.24: Grafana tabanlı analitik izleme ekranı.	83

Şekil 4.25: Mobil uygulama arayüzleri: (a) Dashboard, (b) Kontrol.	86
Şekil 5.1: Sistem açılış ekranı ve LCD’de döngüsel veri gösterimi.	88
Şekil 5.2: pH sensörü iki noktalı kalibrasyon süreci ve doğrulama logları.	90
Şekil 5.3: Sıcaklık artışı ve otomatik fan kontrolüne ilişkin seri port log kaydı.	91
Şekil 5.4: Sıcaklık eşik değerinin aşılması durumunda Node-RED Dashboard’da fan durumunun değişimi: (a) açık, (b) kapalı.	92
Şekil 5.5: Akış güvenliği test senaryosu adımları: (a) normal akış, (b) akış kesintisi, (c) manuel moda geçiş.	94
Şekil 5.6: Otomatik moddan manuel moda geçiş ve yetki devri log kaydı.	96
Şekil 5.7: Manuel LED kontrolü ve sensör geri besleme log kaydı.	97
Şekil 5.8: Node-RED Dashboard’da anlık sistem parametrelerinin izlenmesi.	98
Şekil 5.9: Sistem sensörlerinin 7 günlük değişimi ve enerji kesintisi sonrası tepki: (a) pH, (b) TDS, (c) ortam sıcaklığı, (d) ışık şiddeti.	99
Şekil 5.10: Sensörlerin 30 dakikalık yüksek çözünürlüklü izleme grafiği.	101
Şekil 5.11: Ağ bağlantı kesintisi esnasında sistem durum logları ve yerel kontrol tepkileri.	103

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: MQTT konu hiyerarşisi ve veri akış yönleri.	43
Tablo 4.1: Sistem geliştirme katmanları ve kullanılan temel teknolojiler.	53
Tablo 4.2: ESP32 mikrodnetleyicisi pin bağlantı haritası.	60
Tablo 4.3: 8 kanallı röle modülü aktüatör kontrol listesi.	61
Tablo 4.4: Gömülü yazılım dosya yapısı ve görev dağılımı.	63
Tablo 4.5: MQTT konu başlıkları ve işlevsel görevleri.	74
Tablo 4.6: Mobil uygulama dosya yapısı ve işlevsel görevleri.	85



1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı ve Motivasyon

Küresel ölçekte artan nüfus ve iklim değişikliğinin yol açtığı meteorolojik belirsizlikler, geleneksel tarımsal üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini ve öngörülebilirliğini giderek zorlaştırmaktadır [1]. Açık alan tarımının çevresel koşullara yüksek derecede bağımlı olması; sıcaklık, nem, ışık ve su gibi temel parametrelerin kontrol edilememesi nedeniyle hem ürün verimliliği hem de kalite sürekliliği açısından önemli kısıtlar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yetiştirme ortamının fiziksel koşullarının hassas biçimde denetlenebildiği kontrollü ortam tarımı (Controlled Environment Agriculture – CEA) yaklaşımları ön plana çıkmaktadır [2].

Topraksız tarım (hidroponik) sistemleri, özellikle su ve besin maddelerinin kontrollü kullanımı sayesinde CEA uygulamaları içerisinde etkin bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, bu tez kapsamında ele alınan Besin Film Tekniği (Nutrient Film Technique – NFT) gibi sistemler; besin çözeltisinin sürekliliğini sağlayan elektrikli pompalar ve yardımcı donanımlara bağımlı olmaları nedeniyle arıza ve kesinti durumlarına karşı oldukça hassas bir yapıya sahiptir. Sirkülasyonun kısa süreli dahi kesintiye uğraması, kök bölgesinde hızlı fizyolojik strese yol açabilmekte ve bitki sağlığını doğrudan tehdit edebilmektedir [3]. Bu nedenle NFT sistemlerinde yalnızca çevresel parametrelerin ölçülmesi değil, aynı zamanda sistemin kesintisiz ve güvenilir biçimde izlenmesi kritik bir gereklilik hâline gelmektedir.

Mevcut uygulamalarda yaygın olarak kullanılan manuel ölçüm yöntemleri veya izole çalışan yerel kontrolcü yapılar, sistemin dinamik davranışına gerçek zamanlı olarak yanıt verme ve uzun süreli veri sürekliliği sağlama açısından yetersiz kalabilmektedir. Temel problem, yalnızca pH, besin yoğunluğu veya sıcaklık gibi parametrelerin izlenmesiyle sınırlı olmayıp; sistem güvenilirliğinin (reliability) ve ölçüm verilerinin bütünlüğünün (data integrity) korunmasını da kapsamaktadır. IoT tabanlı çözümler bu bütünlük yapıyı hedeflese de literatürdeki birçok yaklaşım ağırlıklı olarak izleme odaklıdır ve kontrol kararlarını ağ bağlantısına bağımlı şekilde gerçekleştirmektedir. NFT gibi sürekli çözelti sirkülasyonunun hayati öneme sahip olduğu sistemlerde, ağ

kesintileri karşısında işlevini yitiren bir kontrol mimarisi kabul edilebilir bir risk değildir.

Bu tez çalışmasının temel motivasyonu; kapalı ortam NFT hidroponik yetiştiricilik sistemlerinde gerekli olan hassas kontrol, anlık müdahale ve uzun dönemli veri analizi ihtiyaçlarını, ağdan bağımsız çalışabilen yerel karar mekanizmaları ile desteklenmiş, güvenilir ve bütünleşik bir IoT mimarisi aracılığıyla karşılamaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, kapalı ortam koşullarında çalışan NFT hidroponik yetiştirme sistemlerinde bitki gelişimini doğrudan etkileyen kritik parametrelerin; pH, besin yoğunluğu (EC/TDS), ortam sıcaklığı ve bağıl nem gibi değişkenler başta olmak üzere, gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve bu veriler temelinde çalışan kural tabanlı kontrol algoritmaları aracılığıyla otonom biçimde yönetilmesini sağlayan bütünleşik bir IoT mimarisinin tasarlanması, gerçekleştirilmesi ve deneysel olarak doğrulanmasıdır. Bu kapsamda, geliştirilen sistemin yalnızca sensör verilerini izleyen bir yapıdan öteye geçerek, ölçüm verilerini karar mekanizmalarına dönüştürebilen bütünleşik bir kontrol mimarisi sunması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında, besin çözeltisi ve ortam koşullarına ait ölçüm verilerinin sürekli olarak toplanması ve önceden tanımlanan eşik değerler doğrultusunda ilgili aktüatörlerin —besin dozaj pompaları, havalandırma fanları ve aydınlatma sistemleri— otomatik olarak kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, insan müdahalesine olan bağımlılık azaltılmış; sistemin uzun süreli işletim koşullarında kararlı, güvenilir ve tekrarlanabilir bir çalışma davranışı sergilemesi amaçlanmıştır.

Buna ek olarak, elde edilen ölçüm verilerinin zaman serisi (time-series) yapısında kaydedilmesiyle; sistemin uzun süreli çalışma davranışının izlenmesi, parametreler arasındaki zamansal ilişkilerin analiz edilmesi ve olası anomali veya sapmaların geriye dönük olarak değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu veri yaklaşımı hem sistemin doğrulanmasına hem de ileride gerçekleştirilebilecek optimizasyon ve genişletme çalışmalarına altyapı sunmaktadır.

Son olarak, geliştirilen mimarinin yalnızca sürekli internet bağlantısına bağımlı bir yapı olmaması; ağ bağlantısında meydana gelebilecek kesintiler sırasında dahi yerel

ağ üzerinde tam işlevselliğini sürdürebilen, yerel karar mekanizmaları ile desteklenmiş hibrit bir haberleşme altyapısı sunması çalışmanın temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bu yaklaşım ile, NFT hidroponik sistemlerin gerektirdiği operasyonel süreklilik ve güvenilirlik kriterlerinin sağlanması amaçlanmıştır.

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Katkıları

Bu tez çalışması, bitki fizyolojisi veya biyolojik büyüme analizlerine odaklanan bir tarımsal araştırma niteliği taşımamakta; hidroponik yetiştirme süreçlerinin gerektirdiği otomasyon, izleme ve veri yönetimi altyapısının elektronik ve yazılım mühendisliği bakış açısıyla tasarlanması ve gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın kapsamı, biyolojik verimlilik değerlendirmelerinden ziyade, sistemin güvenilir, sürdürülebilir ve otonom biçimde çalışmasını sağlayan mühendislik çözümleri ile sınırlandırılmıştır.

Bu bağlamda tez kapsamında; hidroponik sistemin operasyonel sürekliliği açısından kritik öneme sahip olan fizyokimyasal parametrelerin —pH, elektriksel iletkenlik (EC/TDS) ve besin çözeltisi sıcaklığı— ile ortam iklim verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ele alınmıştır. Söz konusu değişkenlerin kararlı bir denge aralığında tutulabilmesi amacıyla, kural tabanlı ve hata toleranslı kontrol algoritmaları geliştirilmiş; sistem güvenliğini riske atabilecek durumların erken aşamada tespit edilerek uygun koruyucu aksiyonların alınması hedeflenmiştir. Bu süreçte, donanım bileşenlerinin tekil işlevlerinden ziyade, bu bileşenlerin bir araya gelerek oluşturduğu bütünlük otomasyon mimarisi ve olay tabanlı (event-driven) karar mekanizmaları ön plana çıkarılmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen sistem, izleme, kontrol ve veri yönetimi katmanlarının birbirinden bağımsız ele alındığı yaklaşımlardan farklı olarak, bu katmanların bütüncül bir mimari içerisinde ele alındığı bir IoT çözümü sunmaktadır. Gömülü kontrol birimi, ağ geçidi ve sunucu katmanları arasında MQTT protokolü üzerinden kurulan haberleşme yapısı sayesinde, modüler ve ölçeklenebilir bir sistem mimarisi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, sistemin farklı donanım ve yazılım bileşenleri ile genişletilebilmesine olanak tanımaktadır.

Ayrıca geliştirilen kontrol altyapısı, yalnızca çevresel parametrelerin regülasyonunu hedeflemekle sınırlı kalmayıp, akış kesintisi veya kritik seviye düşüklüğü gibi

donanım kaynaklı riskleri algılayarak otonom biçimde koruyucu çalışma moduna geçebilen emniyet odaklı (fail-safe) bir kontrol mantığı içermektedir. Bunun yanında, mimari tasarımda bulut servislerine olan bağımlılık bilinçli olarak sınırlandırılmış; ağ bağlantısında meydana gelebilecek kesintiler sırasında dahi gömülü kontrol birimi üzerinde çalışan Sonlu Durum Makinesi (FSM) tabanlı algoritmalar sayesinde sistemin otonom çalışması sağlanmıştır. Bu uç bilişim (edge computing) yaklaşımı, canlı materyalin yaşam döngüsünün haberleşme katmanındaki olası aksaklıklardan etkilenmemesini hedefleyen temel bir mühendislik katkısı olarak değerlendirilmiştir.

1.4. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çalışmanın ele aldığı problem tanımlanmış; bu problem bağlamında motivasyon, amaç, kapsam ve çalışmanın sunduğu katkılar ortaya konulmuştur. Böylece tez boyunca izlenen yaklaşımın kavramsal ve metodolojik çerçevesi oluşturulmuştur.

İkinci bölümde, topraksız tarım ve kapalı ortam yetiştiriciliği kapsamında NFT hidroponik sistemler ile bu sistemlerde kullanılan IoT tabanlı izleme ve kontrol yaklaşımları literatür çerçevesinde incelenmiştir. Bu bölümde, mevcut çalışmaların güçlü ve sınırlı yönleri değerlendirilerek tez kapsamında ele alınan yaklaşımın literatürdeki konumu belirlenmiştir.

Üçüncü bölümde, geliştirilen sistemin donanım ve yazılım mimarisi ayrıntılı olarak açıklanmış; kullanılan sensörler, aktüatörler, haberleşme altyapısı ve kontrol yaklaşımı tasarım düzeyinde ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ise sistemin fiziksel kurulumu ve gerçekleştirme süreci sunulmuş; deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen ölçüm verileri ve sistem davranışları aktarılmıştır.

Beşinci bölümde, deneysel sonuçlar değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Altıncı ve son bölümde ise tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar özetlenmiş; geliştirilen sistemin sınırları ve ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Topraksız Tarım ve Hidroponik Sistemler

Topraksız tarım, bitkilerin büyüme ve gelişimi için gerekli olan su ve mineral besin maddelerinin, doğal toprak ortamı kullanılmaksızın kontrollü biçimde sağlandığı yetiştirme yöntemlerini kapsamaktadır. Bu yaklaşımlarda bitki kökleri ya doğrudan besin çözeltisi içerisinde konumlandırılmakta (su kültürü) ya da perlit, kaya yünü ve kokopit gibi inert destek ortamları aracılığıyla beslenmektedir [4]. Topraksız tarım sistemlerinin temel mühendislik hedefi, bitki gelişimini belirleyen su ve besin parametrelerinin —pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve sıcaklık gibi— dış çevresel belirsizliklerden bağımsız olarak hassas, izlenebilir ve öngörülebilir biçimde yönetilmesini sağlamaktır [5].

Geleneksel tarım uygulamalarında karşılaşılan toprak yapısındaki bölgesel heterojenlik, yoğun kullanım sonucu ortaya çıkan verim kayıpları ve su kaynaklarının etkin biçimde değerlendirilememesi gibi yapısal sorunlar, üretim süreçlerinin standardizasyonunu zorlaştırmaktadır [6]. Bu sınırlamalar, özellikle kaynak kullanım verimliliğini önceleyen alternatif üretim yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar, hidroponik yetiştirme tekniklerinin geleneksel tarıma kıyasla su kullanımında %70 ila %90 arasında tasarruf sağlayabildiğini ve birim alan başına elde edilen ürün miktarını anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır [7].

Hidroponik sistemlerin kapalı ortam tarımı yaklaşımları ile uygulanması, iklim koşullarından büyük ölçüde bağımsız, yıl boyunca sürdürülebilir ve kontrol edilebilir bir üretim modeli sunmaktadır. Bu bağlamda hidroponik yöntemler, yalnızca alternatif bir tarım tekniği olarak değil; sensörler ve aktüatörler aracılığıyla çevresel ve besin parametrelerinin sürekli olarak izlendiği ve yönetildiği bir kontrollü sistem problemi olarak değerlendirilmektedir [4, 8]. Bu özellikleriyle hidroponik sistemler, elektronik, kontrol ve otomasyon mühendisliği disiplinleri açısından da önemli bir araştırma ve uygulama alanı oluşturmaktadır.

2.1.1. Topraksız Tarım Yaklaşımlarına Genel Bakış

Topraksız tarım yaklaşımları, bitki kök bölgesini taşıyan ortamın niteliği ve besin çözeltisinin uygulanma biçimine bağlı olarak farklı sınıflar altında ele alınmaktadır. Bu sınıflandırma, yalnızca yetiştirme tekniğini değil; aynı zamanda sistemin kontrol dinamiğini, hata toleransını ve operasyonel sürekliliğini de doğrudan etkilemektedir.

Hidroponik yöntemler, kök bölgesinin doğrudan besin çözeltisi ile temas hâlinde olduğu ve katı bir yetiştirme ortamının bulunmadığı su kültürü sistemlerini kapsamaktadır. NFT ve Derin Su Kültürü (Deep Water Culture-DWC) bu gruba örnek olarak verilebilir [9]. Bu sistemlerde besin çözeltisinin sürekliliği hayati öneme sahiptir ve kök bölgesinde doğal bir tamponlama mekanizması bulunmamaktadır.

Substrat tabanlı yöntemlerde ise bitki kökleri perlit, kaya yünü veya benzeri inert materyaller içerisinde gelişmekte; besin çözeltisi bu ortama kontrollü biçimde uygulanmaktadır [10]. Substratın su tutma kapasitesi sayesinde kök bölgesinde belirli bir tamponlama etkisi oluşmakta, bu durum kısa süreli besin veya sirkülasyon kesintilerinin bitki üzerindeki etkisini geciktirebilmektedir. Bu özellik, sistemin hata toleransını artıran bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Aeroponik yöntemlerde kökler hava ortamında serbest biçimde asılı tutulmakta ve besin çözeltisi sisleme (mist) yöntemiyle kök yüzeyine uygulanmaktadır [11]. Bu yaklaşım, yüksek oksijenlenme avantajı sunmakla birlikte, besin ve nem sürekliliğine olan aşırı hassasiyeti nedeniyle kontrol açısından yüksek doğruluk ve hızlı müdahale gereksinimi doğurmaktadır.

Bu yaklaşımlar karşılaştırıldığında, substrat tabanlı sistemlerin yüksek tamponlama kapasitesi sayesinde daha toleranslı bir dinamik sergilediği; saf hidroponik ve aeroponik sistemlerin ise düşük tamponlama nedeniyle çevresel ve besin parametrelerindeki ani değişimlere doğrudan ve hızlı tepki verdiği görülmektedir. Özellikle pH ve elektriksel iletkenlikte meydana gelen sapmalar veya sirkülasyon kesintileri, bu sistemlerde bitki kök bölgesine kısa sürede yansımaktadır. Bu karakteristik özellik, hidroponik sistemleri IoT tabanlı hassas izleme, hızlı karar alma ve otonom kontrol algoritmalarının geliştirilmesi açısından ideal bir uygulama alanı hâline getirmektedir [12].

2.1.2. Hidroponik Sistem Tipleri ve Sınıflandırma

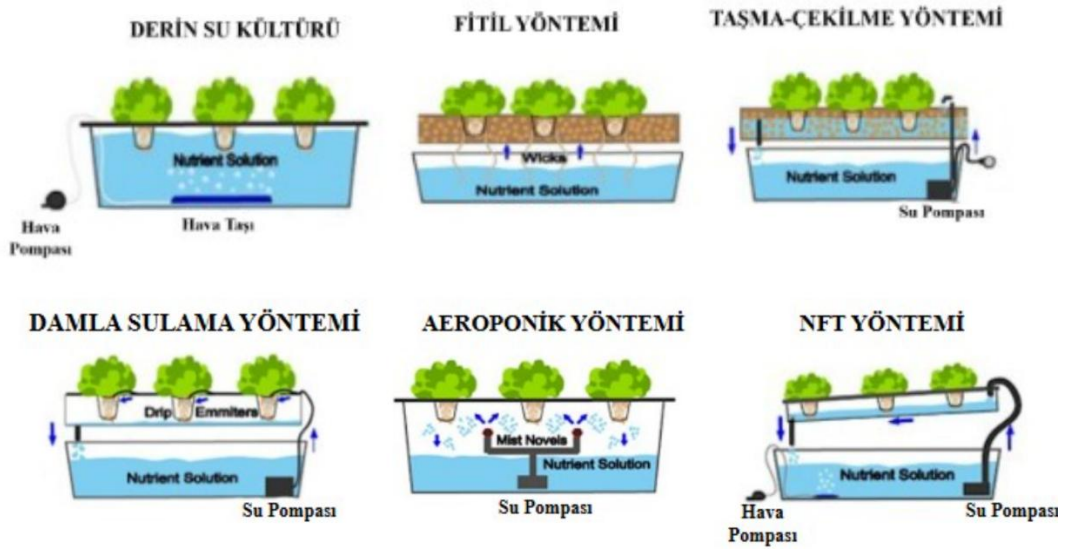
Hidroponik tarım uygulamaları, besin çözeltisinin kök bölgesine iletilme yöntemi, sirkülasyon karakteristiği ve kök bölgesindeki havalanma mekanizmasına bağlı olarak farklı sistem topolojileri altında sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, yalnızca mekanik yapı farklılıklarını değil; aynı zamanda sistemin dinamik davranışını, kontrol gereksinimlerini ve hata toleransı seviyesini de doğrudan etkilemektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan başlıca sistemler; DWC, fitil sistemi, taşma–çekilme (ebb & flow), damla sulama, aeroponik sistemler ve bu çalışmanın odak noktasını oluşturan NFT’dir [13]. Bu sistemlerin temel çalışma prensipleri ve yapısal farklılıkları Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmektedir.

DWC sistemlerinde bitki kökleri, sürekli olarak oksijenlendirilmiş yüksek hacimli bir besin çözeltisi rezervuarı içerisinde konumlandırılmaktadır. Besin çözeltisinin büyük hacmi, pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi parametrelerde meydana gelen ani değişimlerin kök bölgesine yansımaları geciktiren doğal bir sönümleme etkisi oluşturmaktadır. Bu durum, DWC sistemlerini kısa süreli çevresel dalgalanmalara ve ekipman kaynaklı arızalara karşı görece daha toleranslı hâle getirmektedir.

Fitil sistemleri, mekanik pompa veya aktif kontrol bileşeni içermeyen pasif hidroponik yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde besin çözeltisi, kapiler etki prensibine dayalı olarak fitil görevi gören gözenekli bir malzeme aracılığıyla kök bölgesine taşınmaktadır. Enerji gereksiniminin bulunmaması önemli bir avantaj sağlamakla birlikte, besin ve su iletim hızının bitkinin anlık ihtiyaçlarına göre ayarlanamaması sistemin kontrol edilebilirliğini sınırlandırmaktadır.

Taşma–çekilme sistemlerinde kök bölgesi belirli periyotlarla besin çözeltisi altında bırakılmakta ve ardından boşaltılmaktadır. Bu yapı, kök bölgesinin oksijenlenmesini desteklemekle birlikte, zamanlama hassasiyeti yüksek bir kontrol gereksinimi doğurmaktadır. Benzer şekilde damla sulama sistemlerinde besin çözeltisi her bir bitkinin kök bölgesine ayrı ayrı iletilmekte; bu yaklaşım daha karmaşık dağıtım altyapıları ve kontrol mekanizmaları gerektirmektedir. Aeroponik sistemlerde ise besin çözeltisi yüksek basınçlı nozullar aracılığıyla sis formunda kök bölgesine uygulanmakta olup, bu yöntem yüksek oksijenlenme avantajına karşın sirkülasyon ve nem sürekliliğine karşı son derece hassas bir yapı sergilemektedir.

Sistem seçimini belirleyen temel kriterler; enerji verimliliği, kurulum ve işletme karmaşıklığı ile sistemin hata toleransıdır. Örneğin, DWC sistemleri pompa arızaları durumunda dahi saatler hatta günler boyunca çalışabilirliğini sürdürebilirken, aeroponik ve NFT sistemlerinde besin çözeltisi sirkülasyonunun dakikalar mertebesinde kesintiye uğraması bitki kök bölgesinde ciddi strese yol açabilmektedir. Bu yüksek hassasiyet, NFT sistemlerini gerçek zamanlı izleme, hızlı karar alma ve otonom kontrol algoritmalarının geliştirilmesi açısından özellikle uygun bir çalışma alanı hâline getirmektedir.



Şekil 2.1: Yaygın hidroponik sistem türlerinin şematik gösterimi [14].

2.1.3. NFT Tekniği ve Bu Tez Bağlamında Tercih Gerekçesi

NFT, bitki köklerinin hafif eğimli kanallar içerisinde sürekli olarak akan ve derinliği birkaç milimetreyi geçmeyen ince bir besin çözeltisi filmi ile temas hâlinde bulunduğu bir yetiştirme tekniğidir. Bu akış yapısı, köklerin alt kısmının su ve besin maddelerini doğrudan almasını sağlarken, üst kısmının atmosferik oksijen ile temasını mümkün kılmakta ve böylece kök bölgesinde dengeli bir hava-su etkileşimi oluşturmaktadır [6]. Bu özellik, NFT sistemlerini bitki kök bölgesinin oksijenlenmesi açısından

avantajlı kılmakla birlikte, sistem dinamiği açısından yüksek hassasiyet gerektiren bir yapı ortaya çıkarmaktadır.

NFT sistemleri, kök bölgesinde büyük hacimli bir besin rezervuarının bulunmaması nedeniyle düşük tamponlama kapasitesine sahiptir ve bu durum sistemin “düşük zaman sabiti” (low time constant) karakteristiği sergilemesine neden olmaktadır. Besin çözeltisinin sirkülasyonunda meydana gelebilecek bir kesinti; pompa arızası, elektrik enerjisi kaybı veya kanallarda oluşabilecek fiziksel tıkanıklıklar gibi durumlarda, bitki köklerinin çok kısa süre içerisinde su kaybına (desiccation) uğramasına ve geri döndürülemez fizyolojik stres oluşmasına yol açabilmektedir. Benzer biçimde, besin çözeltisi sıcaklığı veya pH değerinde meydana gelen ani değişimler, seyreltici bir tampon mekanizma bulunmadığından doğrudan kök bölgesine yansımakta ve bitki sağlığını hızla olumsuz etkileyebilmektedir [11].

Bu tez çalışmasında NFT yönteminin tercih edilmesinin temel teknik gerekçesi, sistemin bu yüksek hassasiyetli ve hata toleransı düşük yapısıdır. NFT sistemi, bir kontrol mühendisliği problemi olarak ele alındığında; gecikmesiz veri toplama, yüksek güvenilirlikli aktüatör yönetimi ve sürekli durum farkındalığı gerektiren bir yapı sunmaktadır. Bu nedenle NFT, geliştirilen IoT tabanlı mimarinin tepki süresini, kararlılığını ve emniyet mekanizmalarının etkinliğini sınamak açısından en zorlu senaryoyu temsil etmektedir.

Bu bağlamda tez çalışması, yalnızca bir hidroponik üretim uygulamasının gerçekleştirilmesini değil; pH, elektriksel iletkenlik ve akış gibi kritik parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlendiği, yerel karar mekanizmaları ile desteklenen ve emniyet odaklı bir kontrol yaklaşımına sahip siber-fiziksel bir sistemin tasarlanmasını ve doğrulanmasını hedeflemektedir. Böylece NFT sistemi, geliştirilen mimarinin mühendislik performansını ortaya koyan bilinçli bir test platformu olarak değerlendirilmiştir.

2.2. Kapalı Ortam NFT Kontrol Parametreleri

Kapalı ortam koşullarında kurulan NFT hidroponik sistemlerde bitkisel biyokütle üretimi hem çevresel parametrelerin hem de besin çözeltisine ait fizyokimyasal özelliklerin dar tolerans aralıklarında kararlı (stable) biçimde tutulmasına doğrudan bağlıdır. Doğal toprak ortamının sağladığı tamponlama (buffer) mekanizmalarının

bulunmadığı bu sistemlerde, pH, elektriksel iletkenlik veya sıcaklık gibi temel değişkenlerde meydana gelen küçük sapmalar dahi zaman içerisinde kümülatif etki oluşturarak bitki gelişimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle kapalı ortam NFT sistemleri, çok değişkenli ve dinamik bir kontrol problemi olarak ele alınmaktadır.

Süreç yönetiminin etkin biçimde gerçekleştirilebilmesi için ortam sıcaklığı, bağıl nem, besin çözeltisi sıcaklığı, pH ve elektriksel iletkenlik (EC/TDS) gibi kritik parametrelerin sürekli olarak izlenmesi ve bu veriler temelinde çalışan kapalı çevrim kontrol mekanizmalarının uygulanması gerekmektedir [4]. Özellikle NFT sistemlerinin düşük tamponlama kapasitesi, bu parametrelerin yalnızca periyodik ölçümlerle değil, gerçek zamanlı sensör verileri aracılığıyla izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Aksi hâlde, sistemde meydana gelen hızlı değişimlere zamanında müdahale edilememesi bitki kök bölgesinde geri döndürülemez hasarlara yol açabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, zaman ve deneysel kaynak kısıtları nedeniyle bitki gelişimine dayalı biyolojik performans analizleri kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışmanın odağı; kapalı ortam NFT sistemlerinde kullanılan IoT tabanlı izleme ve kontrol altyapısının doğrulanması, sensör verilerinin sürekliliği, kontrol algoritmalarının kararlılığı ve hata durumlarına karşı sistemin tepkisinin değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalar, bitki büyüme çıktılarından ziyade; pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve akış gibi kritik parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi ve yönetilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır.

2.2.1. Ortam Koşulları: Sıcaklık, Bağıl Nem ve Işık Şiddeti

Kapalı ortam NFT sistemlerinde ortam sıcaklığı ve bağıl nem hem bitki gelişimi hem de sensörler ile elektronik donanımın kararlı çalışması açısından kritik çevresel değişkenlerdir. Ortam sıcaklığı bitkinin metabolik faaliyetlerini doğrudan etkilerken, bağıl nem terleme (transpirasyon) yoluyla su ve besin alım hızını belirlemektedir. Bu iki parametrede meydana gelen kontrolsüz dalgalanmalar, bitki stresini artırabildiği gibi sistem genelinde kararsız çalışma koşullarına da yol açabilmektedir [16], [17].

Işık şiddeti ise fotosentez için gerekli olmakla birlikte, kapalı kabin ortamında ek bir ısı yük oluşturarak sıcaklık dengesini dolaylı biçimde etkilemektedir. Bu nedenle ışık

seviyesi, doğrudan biyolojik optimizasyon amacıyla değil; aydınlatma sisteminin doğru çalıştığının doğrulanmasına yönelik bir izleme parametresi olarak ele alınmıştır [18]. Bu tez kapsamında ortam sıcaklığı ve bağıl nem aktif olarak kontrol edilen süreç değişkenleri olarak değerlendirilmiş, ışık şiddeti ise sistem durumu izleme kriteri olarak kullanılmıştır.

2.2.2. Aydınlatma Gereksinimleri: Fotoperiyot ve LED Yaklaşımı

Kapalı ortam tarımında aydınlatma yönetimi, yalnızca sağlanan ışık şiddeti ile değil, ışığın zamansal uygulanma biçimi olan fotoperiyot ile ele alınmaktadır. Fotoperiyot, bitkilerin biyolojik ritmini belirleyen temel zamanlama parametrelerinden biridir ve yapraklı bitkiler için genellikle 12–16 saatlik aydınlatma süreleri önerilmektedir [16].

Bu tez çalışmasında, yüksek enerji verimliliği, düşük ısı yayılım ve mikrodenetleyici tabanlı sistemlerle kolay entegrasyon avantajları nedeniyle LED tabanlı aydınlatma tercih edilmiştir. Aydınlatma sistemi, spektral optimizasyon gibi ileri biyolojik hedeflerden ziyade; zaman tabanlı kontrolün doğruluğunu ve otomasyon altyapısının kararlı biçimde çalıştığını doğrulamaya yönelik bir alt sistem olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşım, tez kapsamında geliştirilen IoT tabanlı kontrol mimarisinin güvenilirliğinin değerlendirilmesine hizmet etmektedir.

2.2.3. Besin Çözeltisi Parametreleri: pH, EC/TDS ve Sıcaklık

Hidroponik sistemlerde bitki besleme sürecinin temelini oluşturan besin çözeltisi, kök bölgesindeki kimyasal dengeyi doğrudan belirleyen kritik bir bileşendir. Çözeltinin doğru biçimde yönetilmesi, besin elementlerinin çözünürlüğünü ve kökler tarafından alınabilirliğini etkileyerek sistem performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu kapsamda besin çözeltisi, pH, elektriksel iletkenlik (EC/TDS) ve sıcaklık olmak üzere üç temel parametre üzerinden izlenmekte ve kontrol edilmektedir [19].

pH, besin elementlerinin çözeltideki kimyasal dengesini ve bitki kökleri tarafından alınabilirliğini belirleyen temel değişkenlerden biridir. NFT sistemlerinde düşük su hacmi ve sınırlı tamponlama kapasitesi nedeniyle, kök bölgesinde gerçekleşen iyon değişimleri pH değerinde hızlı dalgalanmalara yol açabilmektedir. pH ölçümünün mühendislik açısından zorluğu, elektrokimyasal sensörlerin sıcaklığa duyarlı

karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Bhadra ve ark. [20] tarafından ifade edildiği üzere pH elektrodunda oluşan potansiyel fark, Nernst denklemi ile tanımlanmaktadır:

$$V_{pH} = V^0 - \frac{2.303RT}{F} \times pH \quad (2.1)$$

Denklemde yer alan sıcaklık parametresi T , sensör eğimini (slope) doğrudan etkilemekte ve sıcaklık değişimleri pH ölçümünde sistematik sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle kararlı bir pH kontrolü için ham sensör verisinin, anlık sıcaklık bilgisi kullanılarak yazılımsal sıcaklık kompanzasyonuna tabi tutulması gerekmektedir [20].

Elektriksel iletkenlik (EC/TDS), çözeltideki toplam iyon konsantrasyonunu temsil ederek bitkinin beslenme durumunu izlemek için kullanılmaktadır. Kapalı döngü NFT sistemlerinde transpirasyon sonucu su miktarının azalması, EC değerinin artmasına yol açabilmekte ve bu durum kontrol edilmediğinde kök bölgesinde yüksek ozmotik basınç oluşmasına neden olabilmektedir. İyon mobilitesinin sıcaklığa bağlı olması nedeniyle EC ölçümlerinin de sıcaklık katsayısı ile normalize edilmesi zorunludur [21].

Çözelti sıcaklığı, çözülmüş oksijen miktarını ve kök solunum koşullarını etkilemenin yanı sıra, pH ve EC sensörleri için bozucu bir giriş (disturbance) niteliği taşımaktadır. Bu nedenle sıcaklık verisi, sistemde hem termal kararlılığın izlenmesi hem de diğer sensör ölçümlerinin doğrulanması amacıyla referans bir parametre olarak kullanılmaktadır [4].

Bu tez kapsamında pH ve EC/TDS, dozaj pompaları aracılığıyla yönetilen aktif kontrol değişkenleri olarak ele alınmış; besin çözeltisi sıcaklığı ise sistem davranışını izlemeye yönelik bir izleme parametresi olarak tanımlanmıştır.

2.2.4. Sistem Bütünlüğü ve Emniyet Parametreleri: Seviye ve Akış

NFT sistemleri, besin çözeltisi sirkülasyonunun sürekliliğine doğrudan bağlı yapıları nedeniyle arızalara karşı düşük tolerans sergilemektedir. Akışın kesilmesi veya rezervuar sıvı seviyesinin kritik eşik değerlerinin altına düşmesi, kök bölgesinde

çok kısa süre içerisinde kuruma (desiccation) oluşmasına ve sistemin biyolojik açıdan işlevsiz hâle gelmesine yol açabilmektedir [11]. Bu nedenle NFT sistemlerinde akış ve seviye değişkenleri, yalnızca izleme amaçlı parametreler olarak değil, sistem güvenliğini doğrudan belirleyen kritik girdiler olarak değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında akış durumu ve sıvı seviyesi, sistemin çalışmasının sürdürülüp sürdürülmeyeceğine karar veren emniyet kilitleri (safety interlocks) olarak ele alınmıştır. Akışın durması veya seviye değerinin önceden tanımlanan eşiklerin altına düşmesi durumunda, sistemin bu durumu algılayarak otonom biçimde koruma moduna geçmesi temel bir tasarım ilkesi olarak benimsenmiştir. Bu yaklaşımda söz konusu değişkenler, optimizasyon veya performans artırma amaçlı kontrol algoritmalarının bir parçası olmaktan ziyade, sistemin güvenilirliğini (reliability) ve operasyonel sürekliliğini korumaya yönelik emniyet protokollerinin temel girdilerini oluşturmaktadır.

2.3. Akıllı Tarım, IoT ve Haberleşme Yaklaşımları

Akıllı tarım kavramı, geleneksel üretim süreçlerinin bilgi ve iletişim teknolojileri ile bütünleştirilerek veriye dayalı, izlenebilir ve daha etkin biçimde yönetilmesini ifade etmektedir. Bu yaklaşımda Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel yetiştirme ortamı ile dijital izleme ve kontrol altyapıları arasında sürekli veri akışı sağlayarak sistemin temel bileşenlerinden biri hâline gelmektedir [22].

Kapalı ortam hidroponik sistemlerde çevresel değişkenlerin büyük ölçüde kontrol altında tutulabilmesi, IoT tabanlı izleme ve kontrol uygulamalarının etkinliğini artırmaktadır. Bu tür sistemlerde IoT altyapısı, yalnızca anlık sensör verilerinin görüntülenmesini değil; aynı zamanda geçmiş verilerin analiz edilmesini, sistem davranışının değerlendirilmesini ve önceden tanımlanmış kurallar doğrultusunda otomatik kararların alınmasını mümkün kılmaktadır [23].

2.3.1. IoT Tabanlı Mimari Yaklaşımlar

Literatürde IoT tabanlı tarım uygulamaları, sistemin karmaşıklık düzeyine ve kontrol gereksinimlerine bağlı olarak farklı katmanlı mimariler ile modellenmektedir. Temel izleme amaçlı uygulamalarda üç katmanlı (algılama–ağ–uygulama) yapılar yeterli

görülürken; otonom kontrol, sistem güvenliği ve yerel karar verme gereksinimlerinin bulunduğu daha gelişmiş sistemlerde dört katmanlı mimariler tercih edilmektedir [24]. Bu tez çalışmasında benimsenen dört katmanlı mimari yaklaşım, sistem güvenilirliğini artırmaya yönelik olarak aşağıdaki işlevsel katmanlardan oluşmaktadır [24]:

Algılama ve Aktüatör Katmanı, fiziksel ortam ile dijital sistem arasındaki doğrudan etkileşimi sağlayan katmandır. Sensörler aracılığıyla çevresel ve kimyasal parametreler ölçülürken, aktüatörler vasıtasıyla sisteme fiziksel müdahaleler gerçekleştirilmektedir.

Gömülü Kontrol (Edge) Katmanı, ölçülen verilerin yerel olarak işlendiği ve temel kontrol kararlarının alındığı katmandır. Bu katman, ağ bağlantısının kesilmesi durumunda dahi sistemin güvenli biçimde çalışmasını sürdürebilmesini sağlayarak, kritik fonksiyonların bulut bağımlılığından ayrıştırılmasını mümkün kılmaktadır.

Haberleşme Katmanı, gömülü kontrol birimi ile üst seviye yazılım bileşenleri arasındaki veri iletiminden sorumludur. Sensör verileri ve kontrol komutları, olay tabanlı ve yayınlı/abone ol prensibine dayalı bir haberleşme modeli üzerinden (MQTT protokolü kullanılarak) çift yönlü olarak taşınmaktadır.

Kullanıcı Etkileşim Katmanı ise sistem verilerinin görselleştirildiği, analiz edildiği ve kullanıcının sisteme manuel müdahalelerde bulunabildiği mobil veya web tabanlı arayüzleri kapsamaktadır.

Bu katmanlı yapı sayesinde, üst seviyelerde meydana gelebilecek haberleşme veya arayüz kaynaklı aksaklıkların, alt katmanlarda yer alan gömülü kontrol fonksiyonlarını etkilemesi engellenmekte; böylece canlı materyal ile çalışan sistemlerde kritik öneme sahip olan operasyonel süreklilik korunmaktadır.

2.3.2. Haberleşme Yaklaşımları ve MQTT'nin Konumlandırılması

IoT tabanlı tarım sistemlerinde haberleşme altyapısı, algılama katmanında üretilen verilerin izleme ve kontrol bileşenlerine iletilmesini ve oluşturulan kontrol komutlarının aktüatörlere zamanında ulaştırılmasını sağlayan kritik bir yapı taşıdır. Kapalı ortam NFT sistemlerinde pH, EC ve sıcaklık gibi çok sayıda parametrenin eş zamanlı izlenmesi ve kritik durumlarda hızlı tepki gereksinimi, kullanılan haberleşme protokolünün düşük gecikmeli ve kararlı olmasını zorunlu kılmaktadır [19].

Literatürde HTTP, CoAP ve AMQP gibi farklı protokoller yer almakla birlikte, tarımsal IoT uygulamalarında protokol seçimi; düşük bant genişliği kullanımı, sınırlı

işlem gücüne sahip uç birimlerle uyumluluk ve bağlantı kesintilerine karşı dayanıklılık gibi kriterler temel alınarak yapılmaktadır. Bu bağlamda MQTT; yayınla-abone ol (publish/subscribe) iletişim modeline dayalı yapısı, küçük boyutlu veri paketleriyle çalışabilmesi ve düşük donanım gereksinimleri sayesinde zayıf ağ koşullarında dahi kararlı veri iletimine olanak tanınması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir [25].

MQTT mimarisinde sensör düğümleri ile izleme ve kontrol bileşenleri, doğrudan birbirleriyle haberleşmek yerine merkezi bir aracı sunucu (broker) üzerinden veri alışverişi gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım, sistem bileşenleri arasında sıkı bağlantı bağımlılığını ortadan kaldırarak veri üretici ve tüketici bileşenlerin birbirlerinden bağımsız çalışmasını mümkün kılmaktadır. Böylece sistem bileşenlerinin geliştirilmesi, güncellenmesi ve ölçeklendirilmesi daha esnek bir hâl almaktadır.

Bu tez kapsamında MQTT'nin tercih edilmesinin temel gerekçeleri; izleme verileri ile kontrol komutlarının mantıksal olarak ayrıştırılabilmesi ve haberleşme katmanında oluşabilecek gecikmelerin kritik kontrol döngülerini doğrudan etkilememesidir. Ayrıca MQTT'nin sunduğu Hizmet Kalitesi (QoS) seviyeleri, sınırlı kaynaklara sahip gömülü sistemlerde dahi veri kaybının minimize edilmesini sağlayarak sistemin operasyonel güvenilirliğini artırmaktadır [26].

2.3.3. IoT Tabanlı Veri Toplama ve Görselleştirme

Kapalı ortam hidroponik sistemlerde sensör verilerinin yalnızca anlık olarak izlenmesi, sistem davranışının bütüncül biçimde değerlendirilmesi için yeterli değildir. Çevresel ve kimyasal parametrelerin zamana bağlı değişim eğilimlerinin analiz edilebilmesi amacıyla ölçüm verilerinin zaman serisi formatında ve yapılandırılmış biçimde kaydedilmesi gerekmektedir [27].

Bu tez kapsamında veri toplama süreci; sensörlerden elde edilen ölçümlerin fiziksel büyüklüklere dönüştürülmesi, zaman damgası ile etiketlenmesi ve veritabanı katmanına aktarılması adımlarını içermektedir. pH dalgalanmaları, sıcaklığa bağlı histerezis etkileri veya EC değişim hızlarının kayıt altına alınması, sistemin uzun dönemli kararlılığının ve operasyonel performansının geriye dönük olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır [28].

Toplanan verilerin kullanıcı tarafından etkin biçimde yorumlanabilmesi için görselleştirme katmanı kritik bir rol üstlenmektedir. Gösterge panelleri, sensör

verilerini grafikler ve durum göstergeleri aracılığıyla anlamlı bilgiye dönüştürerek, sistemde oluşabilecek anormalliklerin kısa sürede tespit edilmesini ve zamanında müdahale edilmesini mümkün kılmaktadır [29].

2.3.4. IoT Tabanlı Hidroponik Sistemlerde Kontrol Yaklaşımları

Literatürde hidroponik sistemlerin otomasyon düzeyi, kullanılan kontrol yaklaşımına bağlı olarak üç ana sınıf altında incelenmektedir [30]. İzleme odaklı sistemlerde sensör verileri yalnızca kullanıcıya sunulmakta, kontrol kararları manuel olarak alınmaktadır. Kural tabanlı otomasyon yapılarında ise önceden tanımlanmış eşik değerler ve mantıksal koşullar doğrultusunda aktüatörler otomatik olarak tetiklenmektedir [31]. Daha ileri düzey uygulamalarda yapay zekâ veya adaptif algoritmalara dayalı kontrol yaklaşımları kullanılabilmekle birlikte, bu yöntemler yüksek hesaplama gereksinimi ve öngörülemezlik nedeniyle prototip ve kritik sistemlerde risk oluşturabilmektedir. NFT sistemlerinin düşük hata toleransına sahip yapısı dikkate alındığında, bu tez çalışmasında kural tabanlı ve Sonlu Durum Makinesi (FSM) mimarisine dayalı bir kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Sensör verileri, güvenli çalışma aralıkları ile karşılaştırılmakta; bu aralıkların dışına çıkılması durumunda aktüatörler otomatik olarak devreye alınarak sistemin kararlı ve güvenli biçimde çalışması sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, sistem davranışının öngörülebilirliğini artırmakta ve gömülü kontrol birimi üzerindeki hesaplama yükünü sınırlı tutmaktadır [32].

2.4. IoT Tabanlı Hidroponik Sistemler Literatürü

Son yıllarda IoT teknolojilerinin erişilebilirliğinin artmasıyla birlikte, hassas tarım ve hidroponik sistemlere yönelik çok sayıda çalışma literatürde yer almaya başlamıştır. Ancak mevcut çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların büyük bir bölümünün sensör verilerinin toplanması ve görselleştirilmesine odaklandığı; sistem mimarisi, yerel karar verme (edge computing), haberleşme sürekliliği ve emniyet mekanizmaları gibi kritik mühendislik konularının çoğunlukla ikincil planda ele alındığı görülmektedir. Literatürde yer alan IoT tabanlı hidroponik sistemler, sundukları işlevsellik düzeyine göre üç ana grupta değerlendirilebilir. İlk grupta yer alan izleme odaklı çalışmalarda, pH, sıcaklık ve bağıl nem gibi temel parametreler ölçülmekte ve bu veriler web veya bulut tabanlı arayüzler üzerinden kullanıcıya sunulmaktadır. Kushawaha vd. [33] ile

Vineeth ve Ananthan [4] tarafından geliştirilen sistemler bu yaklaşımın tipik örnekleri olup, söz konusu çalışmalarda herhangi bir otonom kontrol veya geri besleme mekanizması bulunmamaktadır. Bu tür yaklaşımlar, kullanıcıya yalnızca durum bilgisi sunmakta; kritik sapmalar karşısında sistemin kendi kendine müdahale edebilme yeteneğini içermemektedir.

İkinci grupta yer alan çalışmalarda izlemeye ek olarak sınırlı otomasyon işlevleri sunulmaktadır. Patil vd. [26], Blancaflor vd. [3] ve Lal [34] tarafından önerilen sistemlerde, belirli eşik değerlerin aşılması durumunda fan veya pompa gibi aktüatörlerin devreye alınmasını sağlayan basit kural tabanlı kontrol yapıları kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmaların büyük bir kısmında NFT sistemleri için hayati öneme sahip olan akış sürekliliği ve rezervuar seviyesi gibi risk parametrelerinin kontrol döngüsüne dâhil edilmediği görülmektedir. Ayrıca bu yaklaşımlar genellikle küçük ölçekli uygulamalarla sınırlı kalmakta ve uzun süreli kararlı çalışma senaryoları yeterince ele alınmamaktadır.

Üçüncü grupta ise izleme ve kontrol işlevlerini bir arada sunan daha kapsamlı sistemler yer almakla birlikte, bu çalışmalarda hazır IoT platformlarına olan bağımlılık dikkat çekmektedir. Waghmare vd. [35] tarafından geliştirilen sistemde olduğu gibi, Blynk veya ThingSpeak benzeri platformlar hızlı prototipleme avantajı sağlasa da yerel ağ üzerinde kesintisiz çalışabilme, özelleştirilmiş kullanıcı arayüzü geliştirme ve katmanlı yazılım mimarisi oluşturma açısından sınırlı kalmaktadır. Bu durum, sistem bileşenleri arasındaki veri akışının deterministik bir mimari çerçevede yönetilememesine ve uzun vadeli güvenilirliğin tartışmalı hâle gelmesine neden olmaktadır.

2.5. Literatürdeki Boşluklar ve Tezin Katkısı

Gerçekleştirilen literatür incelemesi, mevcut çalışmaların önemli bir bölümünün hidroponik sistemlerin ideal ve kesintisiz çalışma koşulları altında değerlendirildiğini göstermektedir. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu, sensörlerin doğru ölçüm yaptığı, haberleşme altyapısının sürekli erişilebilir olduğu ve aktüatörlerin sorunsuz çalıştığı varsayımı üzerine inşa edilmiştir. Ancak pratik uygulamalarda, özellikle NFT hidroponik sistemlerde sensör arızaları, ağ bağlantı kesintileri, pompa tıkanıklıkları veya akışın durması gibi en kötü durum senaryolarının (worst-case) ortaya çıkabildiği bilinmektedir. Bu tür durumların etkin şekilde yönetilememesi, sistem performansının

düşmesine, bitki gelişiminin olumsuz etkilenmesine ve uzun vadede sistem sürdürülebilirliğinin zayıflamasına neden olmaktadır. Literatürde, söz konusu arıza senaryolarında sistemin otonom olarak güvenli duruma geçmesini sağlayan hata güvenli (fail-safe) mekanizmaların ve bütüncül koruma yaklaşımlarının sınırlı düzeyde ele alındığı görülmektedir.

Bu tez çalışması, literatürde tespit edilen bu boşluğu gidermeyi hedefleyerek, algılama, uç kontrol, haberleşme ve kullanıcı etkileşim katmanlarının açık biçimde tanımlandığı ve birbirinden ayrıştırıldığı bütünlük bir sistem mimarisi önermektedir. Geliştirilen IoT tabanlı NFT hidroponik sistem, yalnızca pH, TDS ve sıcaklık gibi çevresel ve kimyasal parametrelerin izlenmesine odaklanmakla kalmayıp, aynı zamanda akış ve tank seviyesi gibi sistem bütünlüğünü doğrudan etkileyen kritik değişkenleri de emniyet odaklı bir kontrol yaklaşımıyla ele almaktadır. Bununla birlikte, hazır bulut tabanlı IoT platformlarına bağımlı olmayan, yerel ağ üzerinde çalışabilen ve özgün kullanıcı arayüzleriyle desteklenen hibrit bir erişim altyapısı sunulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde sistem hem operasyonel süreklilik hem de mühendislik güvenilirliği açısından güçlendirilmiş, sürdürülebilir ve uygulamaya dönük bir çözüm ortaya konulmuştur.

3. GENEL SİSTEM MİMARİSİ

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistemin genel mimari yapısı sunulmakta; sistem bileşenlerinin işlevsel rolleri ile katmanlar arası veri ve kontrol ilişkileri açıklanmaktadır. Önerilen mimari, karmaşık kontrol süreçlerinin yönetilebilir alt birimlere ayrıştırılabilmesi amacıyla Algılama ve Aktüatör, Gömülü Kontrol, Haberleşme ve Kullanıcı Etkileşim olmak üzere dört temel katman üzerine kurgulanmıştır. Bu modüler yapı, izleme ve kontrol işlevlerinin sistematik biçimde tanımlanmasını ve bütüncül bir mimari çerçevede yönetilmesini hedeflemektedir.

Mimari tasarımın yanı sıra, sistemin operasyonel davranışını belirleyen Otomatik Kontrol, Manuel Müdahale ve Kalibrasyon çalışma modlarının mimari bütünlük içerisinde nasıl konumlandırıldığı ele alınmaktadır. Bu modlar arasındaki geçişlerin, sistem kararlılığını ve veri bütünlüğünü koruyacak şekilde FSM tabanlı bir kontrol mantığı ile yönetilmesi, tasarımın temel ilkelerinden biridir. Böylece sistemin yalnızca normal çalışma koşullarındaki davranışı değil, bakım ve kullanıcı etkileşimi gerektiren senaryolara verdiği tepkiler de mimari düzeyde tanımlanmaktadır.

Bu bölüm, sistemin kavramsal tasarımına ve mimari gerekçelerine odaklanmaktadır. Donanım yerleşimi, devre şemaları, yazılımın kod düzeyindeki ayrıntıları ve deneysel doğrulama sonuçları bu bölümün kapsamı dışında tutulmuş; söz konusu gerçekleştirme detayları Bölüm 4 altında sunulmuştur.

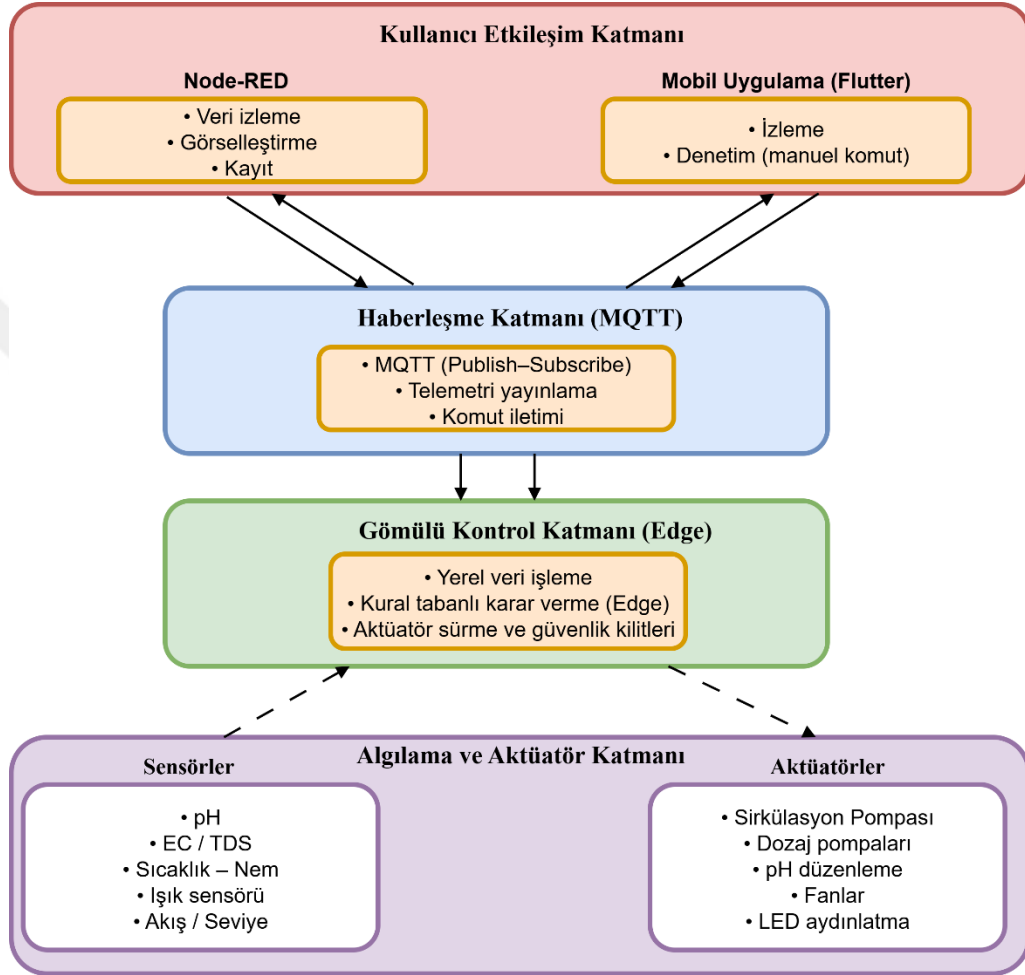
3.1. Sisteme Genel Bakış

Kapalı ortam NFT hidroponik sistemde izlenmesi ve kontrol edilmesi hedeflenen temel süreç değişkenleri (pH, EC, sıcaklık, akış ve seviye), Bölüm 2’de ele alınan sistem gereksinimleri doğrultusunda belirlenmiştir. Sensörler aracılığıyla elde edilen bu veriler, gömülü kontrol birimi tarafından işlenerek sistemin aktif çalışma moduna bağlı olarak uygun aktüatör çıktılarının üretilmesinde kullanılmaktadır.

Sistem tasarımı, tekil bir otomatik kontrol döngüsü ile sınırlandırılmamış; otomatik, manuel ve kalibrasyon modlarını içeren FSM tabanlı bir kontrol yaklaşımı üzerine inşa edilmiştir. Bu modlar arasındaki geçişler sırasında veri bütünlüğünün korunması ve

sistemin kararlı çalışmasının sürdürülmesi, gömülü kontrol katmanında yürütülen FSM mantığı ile denetlenmektedir.

Önerilen dört katmanlı mimari yapı ve katmanlar arasındaki temel veri ve kontrol ilişkileri Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1: IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistemin katmanlı mimari yapısı.

Şekil 3.1’de gösterilen katmanların işlevsel rolleri aşağıda özetlenmektedir.

Algılama ve Aktüatör Katmanı, fiziksel çevre ile dijital sistem arasındaki arayüzü oluşturmaktadır. Yetiştirme ortamına ait pH, sıcaklık, akış ve seviye gibi büyüklükler sensörler aracılığıyla ölçülürken; kontrol sinyalleri aktüatörler üzerinden fiziksel eylemlere dönüştürülmektedir.

Gömülü Kontrol Katmanı, sistemin yerel karar mekanizmasıdır. Sensör verileri bu katmanda işlenmekte, sistem durumuna bağlı kontrol algoritmaları yürütülmekte ve

kritik kararlar ağ bağımlılığı olmaksızın yerel olarak alınmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin ağ gecikmelerinden etkilenmeden gerçek zamanlı tepki verebilmesini sağlamaktadır.

Haberleşme Katmanı, gömülü kontrol birimi ile kullanıcı etkileşim katmanı arasında olay tabanlı bir veri köprüsü görevi üstlenmektedir. MQTT protokolü üzerinden sensör telemetrisi yayınlanmakta ve kullanıcı komutları iletilmektedir. Bu katmanın kapalı çevrim kontrol döngüsünün dışında konumlandırılması, ağ bağlantısında yaşanabilecek kesintiler sırasında dahi sistemin otonom çalışmasını sürdürebilmesini mümkün kılmaktadır.

Kullanıcı Etkileşim Katmanı, Node-RED tabanlı arayüzler ve mobil uygulama (Flutter) aracılığıyla sistem verilerinin görselleştirildiği ve kullanıcının sistemi denetleyebildiği en üst katmandır. Bu katman, kritik kontrol kararlarının üretildiği alt katmanlardan mantıksal olarak izole edilerek, kullanıcı kaynaklı gecikmelerin veya hataların sistem emniyetini etkilemesi engellenmektedir.

3.2. Algılama ve Aktüatör Katmanı

Bu bölümde, geliştirilen hidroponik sistemin fiziksel çevre ile doğrudan etkileşimde bulunan algılama (sensing) ve yürütme (actuation) bileşenleri ele alınmaktadır. Algılama katmanı, ortam koşulları ile besin çözeltisine ait kimyasal ve fiziksel parametreleri temsil eden sürekli ölçüm verilerini üretirken; aktüatör katmanı, gömülü kontrol birimi tarafından üretilen kararların fiziksel ortama uygulanmasını sağlamaktadır.

Algılama ve aktüatör katmanında yer alan donanım bileşenleri, mimari düzeyde iki işlevsel grupta ele alınmaktadır: aktif kontrol döngüsüne geri besleme sağlayan elemanlar ve yalnızca izleme veya emniyet amaçlı kullanılan elemanlar. Bu ayırım, kontrol algoritmalarının kararlılığını artırırken, emniyet kritik durumların bağımsız biçimde ele alınmasına olanak tanımaktadır.

Bu bölümde donanım bileşenlerinin işlevsel rolleri ve seçim gerekçeleri kavramsal düzeyde sunulmaktadır. Bağlantı şemaları, elektriksel özellikler, pin konfigürasyonları ve fiziksel montaj detayları gibi teknik gerçekleştirme ayrıntıları ise Bölüm 4 kapsamında ele alınmıştır.

3.2.1. Besin Çözeltisi ile İlişkili Sensörler

Kapalı ortam hidroponik sistemlerde bitki besleme sürecinin verimliliği, besin çözeltisinin kimyasal ve fiziksel dengesine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle çözeltinin pH değeri, elektriksel iletkenliği (EC/TDS) ve sıcaklığı; sistemin izleme ve kontrol mekanizmalarının temel süreç değişkenleri olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, kök bölgesindeki besin elementlerinin çözünürlüğünü ve bitki tarafından alınabilirliğini doğrudan etkileyerek sistem performansında belirleyici rol oynamaktadır.

3.2.1.1. pH Sensörü

Besin çözeltisinin pH değerini izlemek ve kontrol döngüsüne geri besleme sağlamak amacıyla DFRobot Gravity Analog pH Metre Kiti (V2) kullanılmıştır [1]. Sensörün tercih edilmesindeki temel gerekçe, probdan elde edilen yüksek empedanslı ve milivolt seviyesindeki analog sinyalin, sensör modülü üzerinde gerçekleştirilen sinyal koşullandırma (signal conditioning) işlemleri sonrasında harici bir analog-sayısal dönüştürücü (ADS1115) aracılığıyla yüksek çözünürlükle sayısallaştırılabilmesidir. Bu yaklaşım, ESP32'nin dahili ADC biriminin sınırlı çözünürlük ve doğruluk karakteristiklerinden kaynaklanan ölçüm belirsizliklerini azaltmayı amaçlamaktadır.

Sensör, 0–14 pH ölçüm aralığında çalışmakta ve uygun kalibrasyon koşullarında ± 0.1 pH doğruluk sağlamaktadır. Üretici verilerine göre tepki süresi < 2 dakika olup, NFT sistemlerinde pH değişim dinamiklerinin izlenmesi açısından yeterli performans sunmaktadır [1]. Ölçülen pH değeri, asit/baz dozaj pompalarını yöneten kontrol algoritmalarının ana geri besleme değişkeni olarak kullanılmaktadır. Sensör donanımının genel görünümü Şekil 3.2'de sunulmuştur.



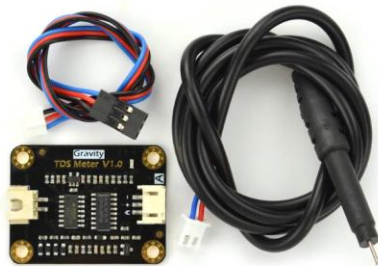
Şekil 3.2: Analog pH probu ve modül devresi.

3.2.1.2. TDS (Toplam Çözünmüş Madde) Sensörü

Besin çözeltisindeki toplam çözünmüş madde miktarının izlenmesi amacıyla DFRobot Analog TDS sensör modülü kullanılmıştır. Sensör, çözelti içerisindeki iyonların elektriksel iletkenliğine bağlı olarak prob uçları arasında oluşan analog gerilim değişimini üretmektedir. Bu analog sinyal, yüksek çözünürlüklü ve kararlı ölçüm elde edilebilmesi amacıyla doğrudan mikrodenetleyicinin dahili ADC birimi yerine harici ADS1115 analog-sayısal dönüştürücü üzerinden sayısallaştırılmaktadır. Bu yaklaşım, düşük seviye analog sinyallerde gürültü etkisini azaltarak ölçüm doğruluğunu artırmaktadır.

Elektriksel iletkenlik temelli TDS ölçümleri, besin çözeltisinin sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Sıcaklık artışı, iyon hareketliliğini artırarak ölçülen iletkenlik değerlerinin yükselmesine neden olabilmektedir. Bu durum, sıcaklık etkisi dikkate alınmadığında ölçüm sonuçlarında sistematik sapmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle geliştirilen sistemde, TDS sensöründen elde edilen ölçüm verileri besin çözeltisi sıcaklığı ile birlikte değerlendirilmiş ve sıcaklık kaynaklı sapmaların azaltılması amacıyla yazılımsal sıcaklık kompanzasyonu uygulanmıştır. Bu kapsamda ölçülen iletkenlik değeri, referans sıcaklık koşuluna normalize edilerek değerlendirilmiş; böylece sıcaklığa bağlı geçici değişimlerin ölçüm sonucuna doğrudan yansımaları engellenmiştir.

Sensörün 0–1000 ppm ölçüm aralığı, hedeflenen NFT hidroponik yetiştirme koşulları için yeterli çözünürlüğü sağlamaktadır. Elde edilen TDS verisi, besin dozaj pompalarını yöneten kontrol algoritmalarının temel geri besleme değişkenlerinden biri olarak kullanılmaktadır. Sensör donanımının fiziksel görünümü Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3: TDS probu ve modül devresi.

3.2.1.3. Besin Çözeltisi Sıcaklık Sensörü

Besin çözeltisi sıcaklığının ölçümü için, uzun kablolama mesafelerinde elektromanyetik gürültüye karşı dayanıklı yapısı nedeniyle OneWire haberleşme protokolünü kullanan dijital DS18B20 sıcaklık sensörü tercih edilmiştir. Paslanmaz çelik problu ve su geçirmez yapısı sayesinde sensör, -55 °C ile +125 °C aralığında güvenilir ve kararlı ölçüm sunmaktadır. Dijital veri iletimi, sirkülasyon pompaları ve diğer aktüatörlerin oluşturabileceği elektriksel gürültüden etkilenmeden ölçüm alınmasına olanak tanımaktadır.

Elde edilen besin çözeltisi sıcaklık verisi, TDS ölçümlerinde sıcaklığa bağlı iletkenlik değişimlerinin etkisini azaltmak amacıyla uygulanan yazılımsal sıcaklık kompanzasyonu sürecinde girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, besin çözeltisi sıcaklığındaki geçici değişimlerin ölçülen TDS değerleri üzerindeki etkisi minimize edilerek daha tutarlı ve güvenilir ölçüm sonuçları elde edilmektedir. Sensörün fiziksel görünümü Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4: DS18B20 sıcaklık sensörü.

3.2.2. Ortam Koşullarına İlişkin Sensörler

Kapalı ortam NFT hidroponik sistemlerde bitki gelişimi, yalnızca kök bölgesindeki besin çözeltisi parametrelerine değil; aynı zamanda yaprak bölgesinde (kanopi) hâkim olan çevresel koşullara da doğrudan bağlıdır. Toprak ortamının sağladığı doğal ısı ataletin bulunmadığı bu yapılarda, hava sıcaklığı ve bağıl nemde meydana gelen ani değişimler bitkinin terleme hızını ve buna bağlı su-besin alım dengesini kısa sürede etkileyebilmektedir.

Bu doğrultuda geliştirilen sistemde ortam sıcaklığı ve bağıl nem, kapalı ortam iklim koşullarının izlenmesi ve gerektiğinde düzenlenmesi amacıyla aktif süreç değişkenleri olarak ele alınmıştır. Işık şiddeti, doğrudan kontrol algoritmalarına geri besleme sağlayan bir değişken olarak kullanılmamış; aydınlatma sisteminin fotoperiyot tabanlı çalışma doğruluğunu ve operasyonel sürekliliğini izlemeye yönelik bir doğrulama parametresi olarak algılama katmanına entegre edilmiştir.

3.2.2.1. Ortam Sıcaklık ve Bağıl Nem Sensörü (AHT10)

Kabin içi mikroklima koşullarının izlenmesi amacıyla, hızlı tepki süresi ve ölçüm kararlılığı nedeniyle AHT10 dijital sıcaklık ve bağıl nem sensörü tercih edilmiştir. Sensör, I²C haberleşme arayüzü üzerinden ortam sıcaklığı ve bağıl nem değerlerini kalibre edilmiş dijital veriler olarak sunmaktadır. -40 °C ile +85 °C çalışma aralığına sahip olan sensör, havalandırma fanlarının kontrolünde gerekli olan güvenilir geri beslemeyi sağlamaktadır. Sensör modülünün fiziksel görünümü Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5: AHT10 sıcaklık ve bağıl nem sensörü.

3.2.2.2. Işık Şiddeti Sensörü (BH1750)

LED tabanlı aydınlatma sisteminin operasyonel durumunu ve fotoperiyot döngüsünün doğruluğunu izlemek amacıyla BH1750 dijital ışık şiddeti sensörü kullanılmıştır. LDR tabanlı analog çözümlerin aksine, bu sensör ortamdaki ışık seviyesini lüks (Lux) biriminden sayısal olarak üretmektedir. I²C arayüzü üzerinden haberleşen BH1750 sensörü, 1–65.535 lüks aralığındaki ölçüm kapasitesiyle aydınlatma sisteminde oluşabilecek arıza veya performans düşüşlerinin erken tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Sensörün fiziksel görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: BH1750 ışık şiddeti sensörü.

3.2.3. Emniyet Amaçlı Sensörler

NFT hidroponik sistemlerin temel zayıflığı, besin çözeltisi sirkülasyonunda oluşabilecek kesintilere karşı düşük tolerans göstermeleridir. Akışın durması veya rezervuar seviyesinin kritik eşiklerin altına düşmesi durumunda, kök bölgesi dakikalar içerisinde kuruma riskiyle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu nedenle akış ve seviye sensörleri, bu tez kapsamında yalnızca izleme amaçlı bileşenler olarak değil; sistemin güvenli çalışma koşullarını tanımlayan ve arıza senaryolarında koruyucu tepkileri tetikleyen donanımsal emniyet kilitleri (safety interlocks) olarak konumlandırılmıştır.

3.2.3.1. Akış Sensörü (YF-S201)

Sirkülasyon hattındaki akış sürekliliğini denetlemek amacıyla Hall etkisi prensibiyle çalışan YF-S201 türbin tipi akış sensörü kullanılmıştır. Sensör içerisindeki manyetik rotor, besin çözeltisi akışıyla orantılı hızda dönerek çıkışta frekansı akış hızına bağlı olan kare dalga (pulse) sinyali üretmektedir.

Bu tez çalışmasında söz konusu sensör, konvansiyonel hacimsel debi ölçümünden ziyade, sirkülasyon hattında akışın varlığı veya kesintiye uğraması durumunu tespit etmeye yönelik bir emniyet ve izleme bileşeni olarak değerlendirilmiştir. Akış sinyalinin kaybolması durumunda sistem, kontrol yazılımı aracılığıyla güvenli moda alınmakta ve ilgili aktüatörler devre dışı bırakılmaktadır. Sensörün fiziksel görünümü Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7: Türbin tipi akış sensörü.

3.2.3.2. Seviye Sensörü (HC-SR04)

Besin rezervuarındaki sıvı seviyesinin izlenmesi amacıyla, hareketli parça içermemesi nedeniyle HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörü tercih edilmiştir. Hidroponik çözeltilerde zamanla oluşabilen tuz kristalleşmesi ve biyofilm tabakaları, mekanik temaslı seviye sensörlerinde sıkışma ve ölçüm hatalarına yol açabildiğinden, temassız ölçüm yaklaşımı benimsenmiştir.

Sensör, ultrasonik dalgaların gönderilmesi ve sıvı yüzeyinden yansyarak geri dönmesi için geçen süreyi esas alan uçuş süresi (Time-of-Flight) prensibiyle çalışmakta ve bu süre üzerinden sıvı yüzeyine olan mesafeyi hesaplamaktadır. Sistem içerisinde seviye sensörü, aktif kontrol girdisi olarak değil, pompa ve sirkülasyon sistemlerinin kuru çalışmasını önlemeye yönelik bir emniyet ve koruma bileşeni olarak konumlandırılmıştır. Seviye değeri önceden tanımlanan kritik eşik seviyesinin altına düştüğünde, sirkülasyon ve dozaj pompaları otonom olarak devre dışı bırakılarak kavitasyon, aşırı ısınma ve donanım hasarı riskleri azaltılmaktadır. Sensörün fiziksel görünümü Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8: Ultrasonik seviye sensörü.

3.2.4. Aktüatör Katmanı

IoT tabanlı bir kontrol sisteminin etkinliği, algılama katmanında tespit edilen sapmalara fiziksel süreçte ne derece doğru, güvenilir ve zamanında müdahale edilebildiği ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda aktüatör katmanı, yalnızca açma–kapama komutlarını yerine getiren pasif bir yürütme birimi olarak değil; gömülü kontrol katmanında üretilen kararların fiziksel sistem davranışına dönüştürüldüğü kritik bir işlevsel katman olarak ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan aktüatörler (sirkülasyon pompaları, dozaj pompaları, fanlar ve aydınlatma elemanları), sistemin farklı çalışma senaryoları ve emniyet

gereksinimleri dikkate alınarak seçilmiştir. Sürekli çalışması gereken birimler ile yalnızca eşik aşımı durumlarında devreye giren elemanlar mimari olarak ayrıştırılmış; güç tüketimi, anahtarlama sıklığı ve kontrol hassasiyeti gibi kriterler tasarım sürecinde belirleyici olmuştur. Özellikle besin ve pH düzenleme süreçlerinde kullanılan dozaj pompalarının, kimyasal dengeyi ani ve kontrolsüz biçimde bozmayacak şekilde düşük debili ve kısa süreli çalışmaya uygun yapıda olmasına özen gösterilmiştir.

3.2.4.1. Besin Çözeltisi Sirkülasyon Pompası

NFT hidroponik sistemde sirkülasyon pompası, besin çözeltisinin rezervuardan bitki kanallarına sürekli ve kararlı biçimde iletilmesini sağlayan temel aktüatördür. Bu çalışmada, uzun süreli çalışmaya uygun, düşük gürültülü fırçasız DC (BLDC) yapıda bir dalgıç pompa kullanılmıştır.

Pompa, normal çalışma koşullarında gömülü kontrol birimi tarafından röle modülü üzerinden sürekli olarak sürülmektedir. Bununla birlikte, sistem emniyetini sağlamak amacıyla pompa kontrolü; akış sensörü ve sıvı seviye sensöründen elde edilen geri besleme verileriyle ilişkilendirilmiş olup, kritik durumlarda (akış kesilmesi veya seviye düşmesi) otomatik olarak devre dışı bırakılmaktadır (Bkz. Bölüm 3.2.3).

Bu yaklaşım sayesinde, pompa yalnızca bir taşıyıcı eleman olarak değil, sistemin donanımsal emniyet mekanizmasının aktif bir bileşeni olarak görev yapmaktadır. Pompanın fiziksel görünümü Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9: BLDC dalgıç sirkülasyon pompası.

3.2.4.2. Dozaj Pompaları (Besin ve pH Düzenleme)

Besin çözeltisinin kimyasal dengesinin sağlanması, sistemde peristaltik dozaj pompaları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu pompalar, sabit debili çalışma karakteristikleri sayesinde dozajlanan kimyasal miktarın, pompanın aktif kalma süresi üzerinden hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, ani kimyasal değişimlerin önüne geçmek ve çözeltinin kararlılığını korumak amacıyla zaman oransal kontrol (time-proportional control) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda pH veya EC sensörlerinden elde edilen ölçüm değerleri, tanımlı hedef aralıklarla karşılaştırılmakta; ölçüm değeri hedef aralıktan uzaklaştıkça dozaj pompasının aktif kalma süresi artırılmakta, hedef aralığa yaklaşıldığında ise kısa süreli ve aralıklı çalıştırmalar tercih edilmektedir.

Böylece aşırı dozajlama riski azaltılmakta ve besin çözeltisinin kimyasal kararlılığı korunmaktadır. Dozaj pompalarının fiziksel görünümü Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10: Peristaltik dozaj pompaları.

3.2.4.3. Ortam İklim Kontrol Fanları (Giriş / Egzoz)

Kapalı kabin ortamında sıcaklık ve bağıl nem değerleri; LED aydınlatma, bitki transpirasyonu ve sınırlı hava hacmi nedeniyle zaman içerisinde değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle sistemde, kabin içi mikro iklimin kararlı tutulabilmesi amacıyla temiz hava girişi ve kirli hava tahliyesi için bağımsız DC fanlar kullanılmıştır.

Fanlar, gömülü kontrol birimi tarafından röle modülü üzerinden aç–kapa mantığıyla sürülmektedir. Eşik değerler çevresinde oluşabilecek hızlı açma–kapama döngülerini önlemek ve röle elemanlarının mekanik yıpranmasını azaltmak amacıyla kontrol algoritmasında histerezis tabanlı bir yaklaşım uygulanmıştır. Buna göre fanlar, sıcaklık veya bağıl nem üst eşik değerini aştığında devreye alınmakta; ilgili parametre alt eşik seviyesine düşene kadar çalışmaya devam etmektedir.

Bu kontrol stratejisi ile kabin içerisinde biriken sıcak ve nemli havanın uzaklaştırılması, taze hava ve CO₂ girişinin sağlanması ve yüksek neme bağlı biyolojik risklerin azaltılması hedeflenmiştir. Fanların fiziksel görünümü Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.11: Kabin içi DC fanlar.

3.2.4.4. Bitki Büyüme Aydınlatma Sistemi

Kapalı ortam koşullarında fotosentez için gerekli ışık enerjisi, tam spektrumlu LED aydınlatma elemanları aracılığıyla sağlanmaktadır. Aydınlatma sistemi, gömülü kontrol birimi tarafından röle modülü üzerinden sürülmekte ve fotoperiyot esaslı bir çalışma mantığıyla yönetilmektedir.

Gömülü kontrol birimi, gerçek zamanlı saat (RTC) modülünden elde edilen zaman bilgisini referans alarak, önceden tanımlanmış aydınlık ve karanlık periyotlara göre LED aydınlatmayı otomatik olarak açmakta veya kapatmaktadır. Bu yaklaşım, bitkinin biyolojik gün–gece döngüsünün korunmasını hedefleyen, basit ve öngörülebilir bir kontrol yapısı sunmaktadır.

Aydınlatma devresinin röle kontağı üzerinden elektriksel olarak izole edilmesi, LED sürücüsünde oluşabilecek istenmeyen kaçak akım kaynaklı ışıldama etkilerini

önlemekte ve sistemin elektriksel güvenliğini artırmaktadır. Kullanılan LED aydınlatma elemanlarının genel görünümü Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12: Tam spektrumlu bitki yetiştirme LED şeritleri.

3.2.5. Yardımcı Donanım Bileşenleri

Kapalı ortam NFT hidroponik sistemlerde güvenilir ve sürdürülebilir bir çalışma yapısının sağlanabilmesi, yalnızca temel sensör ve aktüatörlerin varlığıyla sınırlı değildir. Sistemin yerel olarak izlenebilmesi, zaman tabanlı süreçlerin tutarlı biçimde yönetilmesi ve güç dağıtım altyapısının kararlı hâle getirilmesi amacıyla çeşitli yardımcı donanım bileşenleri sistem mimarisine entegre edilmiştir.

3.2.5.1. Görüntüleme Birimi (LCD Ekran)

Sistemin ağ bağlantısından bağımsız olarak sahada izlenebilmesini sağlamak amacıyla, I²C arayüzü üzerinden haberleşen 16×4 karakter kapasiteli bir LCD ekran kullanılmıştır. Bu birim, sistem için yerel bir insan–makine arayüzü (HMI) işlevi görmektedir.

Mobil uygulama veya sunucu bağlantısında yaşanabilecek olası kesintilerde dahi, pH, EC, sıcaklık gibi kritik parametrelerin ve sistemin aktif çalışma modunun yerel olarak görüntülenebilmesi bakım ve müdahale süreçleri açısından önem taşımaktadır. LCD ekran mimari olarak yalnızca pasif bir görüntüleme birimi olarak konumlandırılmış olup, kontrol döngülerine doğrudan etki etmemektedir. Kullanılan LCD ekran Şekil 3.13’te sunulmuştur.



Şekil 3.13: I²C tabanlı LCD gösterge paneli.

3.2.5.2. Gerçek Zamanlı Saat (RTC) Modülü

Mikrodenetleyicilerin dahili zaman sayaçları, enerji kesintileri sonrasında sıfırlanması nedeniyle zaman duyarlı tarımsal uygulamalar için yeterli değildir. Fotoperiyot yönetiminin sürekliliğinin sağlanması ve sensör verilerinin kronolojik bütünlüğünün korunması amacıyla sistemde DS3231 tabanlı bir gerçek zamanlı saat (RTC) modülü kullanılmıştır.

Sıcaklık kompanzasyonlu kristal osilatöre (TCXO) sahip olan DS3231, yüksek zaman doğruluğu sunmakta; yedek pil desteği sayesinde enerji kesintilerinde dahi zaman bilgisini koruyabilmektedir. Böylece sistem, yeniden başlatma sonrasında zaman tabanlı kontrol süreçlerine doğru noktadan devam edebilmektedir. RTC modülünün fiziksel görünümü Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14: DS3231 gerçek zamanlı saat (RTC) modülü.

3.2.5.3. Güç Adaptörleri ve Besleme Altyapısı

Sistemde kullanılan algılama ve kontrol birimleri ile motorlu aktüatörlerin farklı elektriksel gereksinimlere sahip olması nedeniyle çoklu besleme (multi-rail power supply) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda düşük güçlü elektronik devreler ile yüksek akım çeken yürütücü elemanların beslemesi elektriksel olarak ayrıştırılmıştır.

Sistem mimarisinde:

- 5 V DC hattı, mikrodenetleyici, sensörler ve lojik devreler için,
- 12 V DC hattı, pompalar, fanlar ve LED aydınlatma gibi endüktif yükler için kullanılmıştır.

Bu ayırım sayesinde ani akım çekişleri ve anahtarlama kaynaklı gürültülerin hassas ölçüm devrelerini etkilemesi önlenmiş; ölçüm doğruluğu ve kontrol kararlılığı korunmuştur. Güç kaynakları Şekil 3.15'te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.15: Sistem güç kaynakları a)12V DC b) 5V DC.

3.2.5.4. Aktüatör Sürücü Birimi (8 Kanallı Röle Modülü)

Gömülü kontrol biriminin 3.3 – 5 V seviyesindeki dijital çıkışları ile 12 V DC ile çalışan aktüatörler arasındaki anahtarlama ve izolasyon gereksinimi, 8 kanallı elektromekanik röle modülü kullanılarak karşılanmıştır.

Röle modülü; sirkülasyon pompası, dozaj pompaları, fanlar ve aydınlatma birimlerinin birbirinden bağımsız biçimde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Modül üzerinde yer alan optokuplörler sayesinde kontrol devresi ile güç devreleri arasında elektriksel izolasyon sağlanmış; anahtarlama sırasında oluşabilecek gerilim sıçramaları ve elektromanyetik gürültülerin mikrodenetleyiciye iletilmesi donanım seviyesinde engellenmiştir.

Bu yapı, sistemin uzun süreli ve kararlı çalışmasını destekleyen temel güvenlik katmanlarından birini oluşturmaktadır. Röle modülünün fiziksel görünümü Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16: 8 kanallı röle kartı.

3.3. Gömülü Kontrol Katmanı

Bu bölümde, kapalı ortam NFT hidroponik sistemde algılama katmanından elde edilen sensör verilerini işleyerek aktüatör katmanına yönelik kontrol kararlarını üreten gömülü kontrol altyapısı ele alınmaktadır. Gömülü kontrol katmanı, fiziksel sistem ile üst seviye izleme ve kullanıcı etkileşim bileşenleri arasında konumlandırılmış merkezi karar birimi olarak tasarlanmıştır.

Bu katman üzerinde; sensörlerden elde edilen ham ölçüm verilerinin anlamlı fiziksel büyüklüklere dönüştürülmesi, ölçüm kararlılığının artırılması amacıyla zaman tabanlı örnekleme ve karar geciktirme mekanizmalarının uygulanması, sistemin farklı çalışma modlarının (Otomatik / Manuel / Kalibrasyon) yönetimi ve emniyet senaryolarına ilişkin koruyucu mekanizmaların devreye alınması gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, yeterli işlem gücü ve haberleşme yetenekleri sunan ESP32 tabanlı bir mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Tasarlanan gömülü kontrol birimi; sensör okuma, karar üretme ve yürütücü elemanların röle modülleri üzerinden sürülmesi süreçlerini tek bir yerel kontrol döngüsü içerisinde yürütmektedir. Bu yapı sayesinde sistem, dış ağ bağlantısına veya kullanıcı arayüzlerine bağımlı olmaksızın, önceden tanımlanan kontrol kurallarına göre kararlı ve öngörülebilir biçimde çalışabilmektedir. Böylece ağ gecikmeleri veya bağlantı kopmaları gibi durumlar, sistemin temel işleyişini ve biyolojik sürecin sürekliliğini etkilememektedir.

Bu bölümde, gömülü kontrol mimarisinin genel mantıksal erevesi, çalışma modları arasındaki geçişleri yöneten FSM tabanlı kontrol yaklaşımı ve kontrol algoritmalarının tasarım ilkeleri kavramsal düzeyde açıklanmaktadır. Yazılımın kod seviyesindeki gerçekleme ayrıntıları ve zamanlama yapıları ise Bölüm 4 kapsamında ele alınacaktır.

3.3.1. Gömülü Kontrol Biriminin Rolü ve Donanım Seçimi

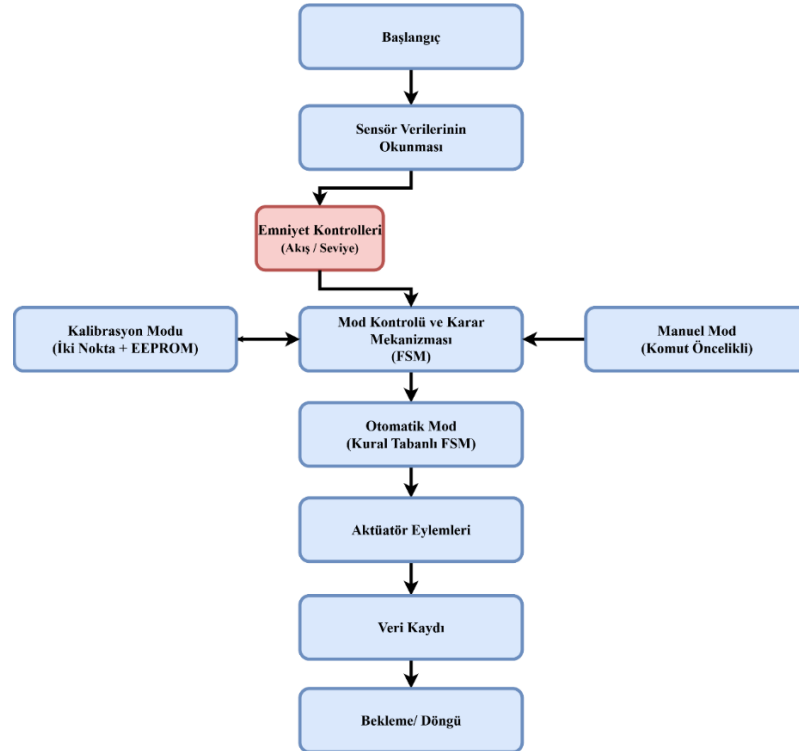
Bu tez çalışmasında geliştirilen gömülü kontrol birimi, sistemin merkezi karar mekanizması olarak işlev görmektedir. Birimin temel sorumluluğu; bulut altyapısı ve mobil uygulama gibi üst katman bileşenlerinden bağımsız olarak, kapalı çevrim kontrol gereksinimlerini gerçek zamanlı ve kesintisiz biçimde yerine getirmektir. Özellikle NFT sistemlerinde kritik öneme sahip pH regülasyonu ve akış sürekliliği gibi

3.3.2. Çalışma Modları ve FSM Yönetimi

Gömülü kontrol sistemlerinde, sistemin hangi çalışma modunda bulunduğunun açık ve kesin biçimde tanımlanmaması; kontrol çatışmalarını, öngörülemeyen sistem davranışlarına ve emniyet risklerine yol açabilmektedir. Bu nedenle önerilen mimaride, tüm kontrol mantığı Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine – FSM) tabanlı bir yönetim yaklaşımı üzerine inşa edilmiştir.

FSM yaklaşımı, sistemin aynı anda yalnızca tek bir çalışma modunda bulunmasını garanti etmekte ve modlar arasındaki geçişlerin önceden tanımlanmış kurallar çerçevesinde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde otomatik kontrol algoritmaları ile kullanıcı kaynaklı manuel müdahaleler arasında oluşabilecek yazılımsal belirsizlikler ortadan kaldırılmakta; aynı giriş koşulları altında sistemin her zaman aynı çıktıyı üretmesini sağlayan, rastlantısal olmayan ve öngörülebilir bir kontrol davranışı elde edilmektedir. Böylece sistemin genel çalışma karakteri, deterministik ve tekrarlanabilir bir yapıya kavuşturulmaktadır.

Sistemde tanımlanan çalışma modları ve bu modlar arasındaki geçişleri gösteren FSM diyagramı Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.18: FSM tabanlı çalışma modları ve mod geçişleri.

Sistemde tanımlanan çalışma modları aşağıda özetlenmiştir:

- Otomatik mod, sistemin varsayılan çalışma durumudur. Bu modda gömülü kontrol birimi sensör verilerini periyodik olarak okuyarak önceden tanımlanmış kural tabanlı kontrol algoritmalarını uygular ve aktüatörleri kullanıcı müdahalesi olmaksızın yönetir. Otomatik mod aktifken kullanıcı arayüzü üzerinden gönderilen doğrudan aktüatör komutları FSM tarafından işleme alınmaz; böylece kontrol döngüsünün bütünlüğü korunur ve kontrol çatışma riski ortadan kaldırılır.
- Manuel mod, bakım, test ve acil müdahale senaryoları için tasarlanmıştır. Bu modda otomatik kontrol algoritmaları devre dışı bırakılır ve aktüatörler kullanıcı komutlarıyla sürülür. Ancak düşük seviye, akış kesintisi gibi donanımsal emniyet mekanizmaları aktif kalmaya devam eder; bu sayede hatalı kullanıcı müdahalelerinin donanıma veya biyolojik sürece zarar vermesi engellenir.
- Kalibrasyon modu, pH ve EC sensörlerinin kalibrasyonu sırasında kullanılan referans çözeltilerin sistemin normal çalışma aralıklarının dışında değerlere sahip olması nedeniyle tanımlanmıştır. Bu modda otomatik kontrol algoritmaları devre dışı bırakılarak tüm aktüatörler güvenli biçimde pasif hâle getirilir ve sensör ayarlarının izole, kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmesi sağlanır.

Bu çalışma modları arasındaki geçişler, FSM mimarisinde endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sarsıntısız geçiş (bumpless transfer) prensibine uygun biçimde tasarlanmıştır. Mod değişimi sırasında sistem, doğrudan yeni kontrol döngüsüne geçmek yerine; önce aktüatörleri güvenli duruma alır, sensör verilerini yeniden örnekler ve kararlı durum doğrulandıktan sonra ilgili kontrol mantığını devreye sokar. Bu yaklaşım, mod geçişleri sırasında oluşabilecek ani elektriksel yüklenmeleri ve mekanik zorlanmaları önleyerek sistem kararlılığını artırmaktadır.

3.3.3. Kural Tabanlı Kontrol Algoritması ve Karar Mantığı

Bu tez çalışmasında kontrol mimarisi tasarlanırken, klasik PID (Oransal–İntegral–Türevsel) denetleyiciler yerine kural tabanlı bir kontrol yaklaşımı tercih edilmiştir.

NFT hidroponik sistemlerde besin çözeltisi sıcaklığı ve iyon konsantrasyonu gibi parametreler görece yüksek ataletle sahipken; pH değişimi logaritmik ve doğrusal olmayan bir karakteristik göstermektedir. Bu tür sistem dinamikleri, doğrusal varsayımlara dayanan PID denetleyicilerin kararlı ve güvenilir biçimde ayarlanmasını zorlaştırmakta, özellikle küçük hacimli ve hızlı tepki gerektiren sistemlerde aşırı kontrol veya salınım riskini artırmaktadır.

Literatürde de hidroponik sistemlerin doğrusal olmayan yapısı ve çevresel etkileşimlere açık karakteri nedeniyle, sezgisel ve kural tabanlı kontrol yaklaşımlarının daha güvenli ve öngörülebilir sonuçlar sunduğu raporlanmaktadır. Bu bağlamda, karmaşık matematiksel modellere dayalı denetim yapıları yerine, sistemin tanımlı güvenli çalışma aralıkları içerisinde tutulmasını esas alan kural tabanlı kontrol stratejilerinin tercih edildiği görülmektedir [36].

Bu çalışmada benimsenen kural tabanlı yaklaşım, sensör verilerine dayalı olarak önceden tanımlanmış eşik ve histerezis değerleri üzerinden karar üreten; düşük hesaplama yüküne sahip, deterministik ve emniyet odaklı bir kontrol yapısı sunmaktadır. Böylece sistem davranışı öngörülebilir hâle getirilmiş, ani çevresel değişimlere karşı kontrollü ve güvenli bir tepki mekanizması oluşturulmuştur.

Bu kapsamda sistemde iki temel kural tabanlı kontrol stratejisi uygulanmıştır. Bu stratejiler, FSM tabanlı çalışma modları içerisinde tanımlanan karar kuralları doğrultusunda devreye alınmakta ve sistemin her zaman tek bir tutarlı kontrol davranışı sergilemesini sağlamaktadır.

- **Histerezis (Ölü Bant) Tabanlı Kontrol:** Fan ve benzeri iklimlendirme elemanlarının kontrolünde, alt ve üst eşik değerlerden oluşan bir histerezis bandı tanımlanmıştır. İlgili parametre üst eşiği aştığında aktüatör devreye alınmakta ve değer alt eşik seviyesine düşene kadar çalışmasını sürdürmektedir. Bu yöntem, eşik değerler civarında oluşabilecek sık açma–kapama davranışlarını önleyerek hem donanım bileşenlerinin mekanik ömrünü uzatmakta hem de sistemin kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır.
- **Zaman Aralıklı (Pulsed) Dozajlama Yaklaşımı:** pH ve EC dengeleme işlemlerinde, dozajlanan kimyasalların besin çözeltisi içerisinde homojen biçimde dağılması belirli bir zaman gerektirdiğinden, sürekli dozajlama yerine adımli (step-based) bir kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yöntemde dozaj

pompaları kısa süreli çalıştırılmakta, ardından sistemin yeni denge durumuna ulaşabilmesi için bekleme süresi tanınmaktadır. Böylece aşırı dozajlama riski azaltılmakta ve kontrol süreci daha güvenli ve öngörülebilir hâle getirilmektedir.

Bu kural tabanlı yapı sayesinde sistem, düşük işlem yükü ile çalışmakta; kontrol kararları önceden tanımlı koşullara bağlı olarak her döngüde aynı biçimde uygulanarak sistem davranışının deterministik ve tekrarlanabilir olması sağlanmaktadır.

3.3.4. Emniyet Kilitleri ve Hiyerarşik Öncelik Mimarisi

Bir kontrol sisteminin başarısı yalnızca hedef parametreleri ne kadar hassas tuttuğuyla değil; arıza ve olağan dışı durumlarda sistemi ne kadar hızlı ve güvenli bir duruma alabilmesiyle değerlendirilmektedir. NFT hidroponik sistemlerde besin akışına tam bağımlılık nedeniyle bu gereksinim daha da kritik hâle gelmektedir.

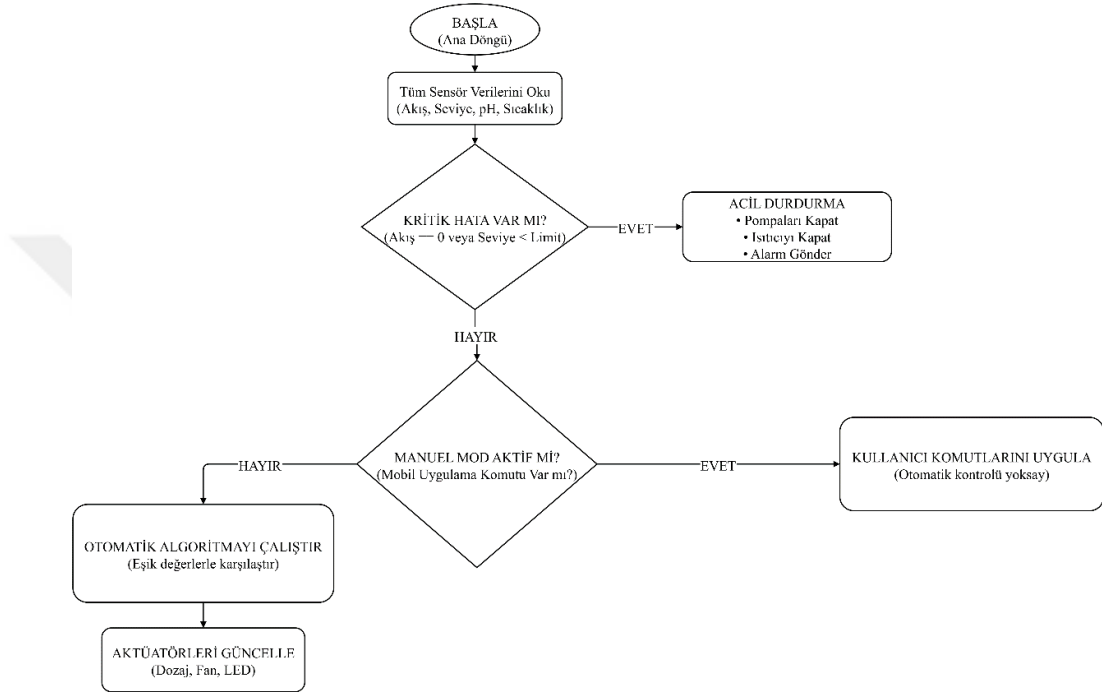
Bu doğrultuda geliştirilen kontrol mimarisinde, emniyet koşulları tüm kontrol kararlarının üzerinde konumlandırılmıştır. Sistem davranışı, emniyet, kullanıcı müdahalesi ve otomatik kontrol arasında hiyerarşik bir öncelik yapısı çerçevesinde yönetilmektedir.

Bu yaklaşım kapsamında akış ve seviye sensörleri, sistemde yalnızca izleme amaçlı değil; doğrudan koruyucu işlev üstlenen emniyet elemanları olarak yapılandırılmıştır. Akış sensöründen beklenen darbe sinyallerinin alınamaması durumu, ciddi bir arıza göstergesi olarak değerlendirilmekte ve bu senaryoda dozaj pompaları otomatik olarak devre dışı bırakılmaktadır. Böylece durgun bir hatta kimyasal madde eklenmesi engellenmektedir. Benzer şekilde, rezervuar sıvı seviyesinin kritik eşik değerin altına düşmesi durumunda sirkülasyon pompası durdurularak kuru çalışma ve donanım hasarı riski önlenmektedir.

Emniyet mekanizmalarının yanı sıra, farklı kaynaklardan gelen kontrol taleplerinin çatışmasını önlemek amacıyla sistemde açık bir öncelik sıralaması tanımlanmıştır. Bu hiyerarşik yapı Şekil 3.19’da gösterilmiştir. En yüksek öncelik, sistem güvenliğini doğrudan etkileyen emniyet durumlarına aittir. Bu koşullar sağlanmadığında, sistem mevcut çalışma modundan bağımsız olarak koruyucu önlemleri devreye almaktadır. Sistem güvenli olduğu sürece, kullanıcı tarafından manuel olarak verilen komutlar

ikinci önceliğe sahiptir. Otomatik kontrol algoritmaları ise yalnızca emniyet koşulları sağlandığında ve manuel müdahale bulunmadığında devreye alınmaktadır.

Bu yapı sayesinde kontrol kararları, emniyet merkezli ve öngörülebilir bir mantıkla uygulanmakta; yazılımsal hataların veya ölçüm gürültülerinin sistemin fiziksel güvenliğini tehdit etmesi engellenmektedir.



Şekil 3.19: Emniyet, manuel ve otomatik modlar arasındaki hiyerarşik karar akışı.

3.4. Haberleşme Katmanı

Bu bölümde, kapalı ortam NFT hidroponik sistemde gömülü kontrol birimi ile üst seviye izleme, kullanıcı etkileşimi ve veri yönetimi bileşenleri arasındaki haberleşme altyapısı ele alınmaktadır. Haberleşme katmanı; sensör verilerinin üst katmanlara aktarılması, kullanıcıdan gelen kontrol taleplerinin alınması ve sistem durum bilgilerinin paylaşılmasını sağlayan bir ara katman olarak konumlandırılmıştır.

Tasarım sürecinde temel hedef, gömülü kontrol birimi üzerinde çalışan yerel kontrol döngüsünün ağ haberleşmesinden işlevsel olarak bağımsız biçimde çalışmasını sağlamaktır. Bu nedenle sensör verilerinin iletimi ve kullanıcı komutlarının alınması süreçleri, kontrol algoritmalarından ayrıştırılmıştır. Böylece haberleşme trafiğinde

oluşabilecek gecikmeler, paket kayıpları veya geçici bağlantı kesintileri, sistemin temel kontrol işleyişini doğrudan etkilememektedir.

Önerilen mimaride tüm kontrol kararları gömülü kontrol birimi üzerinde alınmakta; haberleşme altyapısı yalnızca veri taşıma görevini üstlenmektedir. Üst seviye yazılım bileşenleri, sistemden gelen ölçüm verilerini izleme, kaydetme ve kullanıcıya sunma işlevlerini yerine getirirken; sistemin güvenli ve kararlı çalışması ağ bağlantısının varlığına bağlı olmaksızın sürdürülebilmektedir.

3.4.1. Haberleşme Gereksinimleri

Kapalı ortam NFT hidroponik sistemlerin sürekli çalışan ve zamana bağlı süreçler içeren yapısı, haberleşme altyapısının güvenilir, esnek ve kaynak verimli olacak şekilde tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda haberleşme katmanı için belirlenen temel mühendislik gereksinimleri aşağıda özetlenmiştir:

- **Zaman Damgalı Telemetri:** pH, TDS/EC, sıcaklık, akış ve seviye gibi kritik sensör verilerinin, ölçüm zaman bilgisi ile ilişkilendirilmiş şekilde üst katmanlara aktarılması gerekmektedir. Bu yaklaşım, sistem davranışının geçmişe dönük analizini ve uzun dönemli değerlendirmeleri mümkün kılmaktadır.
- **Düşük Gecikmeli Komut İletimi:** Kullanıcı arayüzü üzerinden gönderilen manuel müdahale komutlarının, özellikle bakım ve acil durum senaryolarında, kabul edilebilir gecikme süreleri içerisinde gömülü kontrol birimine ulaşması hedeflenmiştir.
- **Gevşek Bağlı Mimari:** Haberleşme altyapısının gömülü kontrol birimi ile üst seviye yazılım bileşenleri arasında katı bir bağımlılık oluşturmaması temel tasarım ilkelerinden biridir. Gömülü kontrol birimi, ürettiği verileri belirli bir alıcıya bağlı kalmaksızın yayınlamakta; verinin alınıp alınmaması yerel kontrol kararlarını etkilememektedir.

Bu yapı sayesinde sunucu tarafında yapılacak yazılım güncellemeleri, bakım işlemleri veya geçici kesintiler sırasında dahi, sahadaki gömülü kontrol birimi önceden tanımlanmış yapılandırma parametreleriyle otonom biçimde çalışmaya devam edebilmektedir. Ağ bağlantısının yeniden sağlanmasının ardından ise telemetri aktarımı kesintiye uğramadan sürdürülmektedir. Böylece haberleşme katmanı, kontrol

sisteminin sürekliliğini tehdit eden bir unsur olmaktan çıkarılarak, sistem kararlılığını destekleyen tamamlayıcı bir bileşen hâline getirilmiştir.

3.4.2. MQTT Tabanlı Haberleşme Yapısı

Geliştirilen sistemde, gömülü kontrol biriminin sınırlı donanım kaynaklarına sahip olması ve kablosuz ağ koşullarının zaman zaman kararsızlık gösterebilmesi nedeniyle, uygulama katmanı haberleşme protokolü olarak MQTT tercih edilmiştir. MQTT; düşük başlık boyutuna sahip, işlemci ve bellek gereksinimi minimal olan hafif (lightweight) protokol yapısı, düşük bant genişliği gereksinimi ve bağlantı kopmalarına karşı toleranslı çalışma özellikleri sayesinde IoT tabanlı kontrol sistemleri için uygun bir haberleşme altyapısı sunmaktadır.

HTTP gibi istek–cevap (request–response) temelli protokollerin aksine MQTT, Yayınla–Abone Ol (publish–subscribe) haberleşme modelini esas almaktadır. Bu modelde veri üreten ve tüketen bileşenler arasında doğrudan bir bağ bulunmamakta; tüm veri akışı bir mesaj aracısı (broker) üzerinden yürütülmektedir. Bu yaklaşım sayesinde sistem bileşenleri arasında gevşek bağlı (loosely coupled) bir yapı elde edilmekte ve üst katman yazılımlarında gerçekleştirilen güncellemeler veya geçici servis kesintileri, gömülü kontrol biriminin yerel kontrol döngüsünü etkilememektedir.

3.4.2.1. Veri Paketleme ve Konu (Topic) Hiyerarşisi

ESP32 tabanlı gömülü kontrol birimi, sensörlerden elde edilen ölçüm verilerini, sistemin aktif çalışma modunu ve durum bilgilerini JSON formatında paketleyerek MQTT ağına yayınlamaktadır. Bu yapı, farklı yazılım bileşenlerinin (izleme panelleri, veri tabanları ve mobil uygulamalar) aynı veri akışını eş zamanlı olarak tüketebilmesine olanak tanımaktadır.

Haberleşme trafiği, işlevsel ayrışmayı korumak ve veri karmaşasını önlemek amacıyla telemetri, durum, komut ve yapılandırma olmak üzere farklı konu başlıkları altında yapılandırılmıştır. Bu konu hiyerarşisi sayesinde, izleme amaçlı veri akışları ile kontrol ve yapılandırma mesajları birbirinden mantıksal olarak ayrıştırılmıştır.

Sistemde kullanılan MQTT konu yapısı, yayıncı–abone ilişkileri ve veri akış yönleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1: MQTT konu hiyerarşisi ve veri akış yönleri.

Konu Başlığı	Yayıncı	Abone	İçerik
.../telemetry	ESP32	Node-RED / Mobil	pH, EC, sıcaklık, akış ve seviye ölçümleri
.../status	ESP32	Node-RED / Mobil	Çalışma modu ve hata durumu
.../command	Node-RED / Mobil	ESP32	Aktüatör aç/kapa komutları
.../setting	Node-RED / Mobil	ESP32	pH ve EC hedef değerleri

3.4.2.2. Hizmet Kalitesi (QoS) Yönetimi

Haberleşme güvenilirliğini artırmak amacıyla MQTT protokolünün sunduğu Hizmet Kalitesi (Quality of Service, QoS) mekanizmalarından yararlanılmıştır. MQTT’de QoS, bir mesajın ağ üzerinden kaç kez ve hangi teslimat garantisiyle iletileceğini tanımlayan bir kontrol mekanizmasıdır. Bu tez çalışmasında, özellikle kullanıcıdan gelen kontrol komutları gibi kritik mesajlarda, ağda meydana gelebilecek geçici kopmalara rağmen iletimin güvence altına alınması hedeflenmiştir. Bu kapsamda QoS Seviye 1 (At Least Once) kullanılarak mesajların hedefe en az bir kez ulaştırılması ve iletim sırasının korunması sağlanmıştır.

Bu mimaride ESP32, yalnızca bir MQTT istemcisi olarak görev yapmakta; ağ üzerinden alınan hiçbir komut doğrudan aktüatör katmanına iletilmemektedir. Tüm komutlar, gömülü kontrol katmanında çalışan FSM tabanlı kontrol mantığı tarafından aktif çalışma modu ve emniyet koşulları açısından değerlendirilmektedir. Yalnızca sistemin güvenli çalışma şartları sağlandığında ilgili aktüatörler sürülmektedir. Bu yaklaşım, haberleşme katmanı ile kontrol algoritmaları arasındaki sınırları netleştirerek sistemin kararlı ve güvenilir çalışmasına katkı sağlamaktadır.

3.4.3. Node-RED Tabanlı Entegrasyon Katmanı

Sahadan elde edilen MQTT tabanlı ölçüm verilerinin işlenmesi, yönlendirilmesi ve üst seviye yazılım bileşenleriyle entegrasyonu amacıyla, akış tabanlı programlama yaklaşımını benimseyen Node-RED platformu kullanılmıştır. Önerilen mimaride Node-RED, gömülü kontrol katmanı ile izleme, kullanıcı etkileşimi ve veri yönetim

bileşenleri arasında konumlanan bir entegrasyon ve yönlendirme katmanı (middleware) olarak yapılandırılmıştır.

Node-RED'in sistem içerisindeki temel işlevleri şu şekilde özetlenebilir:

- **Veri Ayırıştırma ve Paralel Dağıtım:** MQTT üzerinden alınan JSON formatındaki sensör verileri, Node-RED üzerinde tanımlanan paralel çalışan akışlar içerisinde ayrıştırılarak eş zamanlı biçimde farklı yazılım bileşenlerine yönlendirilmektedir. Aynı veri paketi; gerçek zamanlı izleme panellerine, zaman serisi veritabanına ve mobil istemcilere çoğaltma gerektirmeksizin aktarılabilir. Bu yaklaşım, veri tutarlılığını korurken sistemin ölçeklenebilirliğini artırmaktadır.
- **Kullanıcı Komutlarının Ön Değerlendirilmesi:** Kullanıcı arayüzlerinden gelen manuel kontrol komutları, sistemin aktif çalışma moduna bağlı olarak Node-RED üzerinde ön filtrelemeden geçirilmektedir. Örneğin otomatik mod aktifken doğrudan aktüatörleri hedefleyen komutlar engellenerek, gömülü kontrol algoritmalarının bütünlüğü korunmaktadır. Bu yapı, karar alma sürecini devralmaksızın güvenli bir ara katman işlevi sunmaktadır.
- **Protokol ve Platformlar Arası Ağ Geçidi İşlevi:** Node-RED, MQTT tabanlı gömülü sistem ile HTTP tabanlı servisler, veritabanları ve mobil uygulamalar arasında esnek bir entegrasyon altyapısı sağlamaktadır. Böylece farklı haberleşme protokollerine ve yazılım ortamlarına sahip bileşenler tek bir mimari yapı altında birleştirilmektedir.

Bu noktada özellikle vurgulanmalıdır ki, Node-RED üzerinde hiçbir kritik kontrol veya karar algoritması yürütülmemektedir. pH ve EC dozajlama, emniyet kilitleri ve çalışma modu yönetimi tamamen gömülü kontrol birimi (ESP32) üzerinde gerçekleştirilmektedir. Node-RED yalnızca bu kararların çıktısını taşıyan verilerin yönlendirilmesi ve kullanıcıya sunulmasından sorumludur.

Bu mimari yaklaşım sayesinde, sunucu veya ağ altyapısında meydana gelebilecek geçici kesintiler sistemin yerel kontrol döngüsünü etkilememekte; bitki yetiştirme süreci gömülü kontrol katmanı tarafından kesintisiz ve güvenli biçimde sürdürülebilmektedir.

Bu mimari tercih sayesinde, sunucu veya ağ altyapısında meydana gelebilecek bir kesinti durumunda dahi, sistem yerel kontrol döngüsünü kesintisiz biçimde sürdürerek bitki yetiştirme sürecinin güvenliğini korumaktadır.

3.5. Kullanıcı Etkileşim Katmanı

Bu bölümde, geliştirilen kapalı ortam NFT hidroponik sistem ile kullanıcı (operatör) arasındaki etkileşimi sağlayan İnsan–Makine Arayüzü (Human–Machine Interface, HMI) bileşenleri ele alınmaktadır. Kullanıcı etkileşim katmanı; gömülü kontrol birimi tarafından üretilen sensör ölçümlerinin, sistem çalışma modunun ve durum bilgilerin kullanıcıya anlaşılır biçimde sunulmasını ve kullanıcıdan gelen denetleyici düzeydeki komutların sisteme güvenli biçimde iletilmesini sağlayan en üst mimari katman olarak yapılandırılmıştır.

Bu katmanın tasarımında temel ilke, kontrol ve karar verme yetkisinin tamamen gömülü kontrol katmanında tutulmasıdır. Kullanıcı etkileşim katmanı, herhangi bir otomatik kontrol algoritması veya otonom karar mekanizması içermemekte; yalnızca izleme ve üst seviye denetleyici müdahaleye imkân tanıyan bir yapı sunmaktadır. Böylece sistemin fiziksel güvenliği ve kontrol kararlılığı, kullanıcı arayüzlerinden bağımsız olarak korunmaktadır.

Kullanıcı arayüzü üzerinden iletilen tüm komutlar, doğrudan aktüatörlere uygulanmak yerine, gömülü kontrol birimi üzerinde çalışan FSM tabanlı kontrol mantığı tarafından aktif çalışma modu ve emniyet koşulları açısından değerlendirilmektedir. Komutlar yalnızca sistemin güvenli çalışma şartları sağlandığında yürürlüğe alınmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, gecikmeler, ağ problemleri veya hatalı kullanıcı girdileri sistemin fiziksel davranışını doğrudan etkilememektedir.

3.5.1. Sunucu ve Dashboard Tabanlı İzleme

Sistemin genel durumunun bütüncül biçimde izlenebilmesi amacıyla, Node-RED altyapısı üzerinde çalışan web tabanlı bir gösterge paneli (dashboard) geliştirilmiştir. Bu arayüz, MQTT protokolü üzerinden iletilen sensör verilerini işleyerek kullanıcıya grafiksel ve sayısal göstergeler şeklinde sunmaktadır.

İzleme altyapısı iki temel düzeyde yapılandırılmıştır. İlk düzeyde, pH, EC, sıcaklık ve bağıl nem gibi sürekli değişen parametreler, zamana bağlı değişimleri gösteren zaman serisi grafikler aracılığıyla sunulmaktadır. Bu yapı, sistemin uzun süreli davranışının analiz edilmesine ve yavaş gelişen sapmaların eğilim analizi yoluyla fark edilmesine olanak tanımaktadır.

İkinci düzeyde ise aktüatörlerin açık/kapalı durumları, sistemin aktif çalışma modu ve haberleşme durumu gibi ayırık bilgiler, görsel durum göstergeleri aracılığıyla sunulmaktadır. Bu yaklaşım, kullanıcının sistemin genel sağlığını hızlı ve sezgisel biçimde değerlendirebilmesini sağlamaktadır.

Dashboard katmanı, mimari olarak yalnızca izleme amaçlı pasif bir bileşen olarak konumlandırılmıştır. Sunucu tarafında meydana gelebilecek yazılımsal arızalar veya ağ kesintileri, gömülü kontrol döngüsünü etkilememekte; yalnızca uzaktan izleme işlevlerinin geçici olarak devre dışı kalmasına neden olmaktadır.

3.5.2. Mobil Uygulama Üzerinden Erişim (Flutter)

Sistemin uzaktan izlenebilirliğini artırmak amacıyla, çapraz platform desteğine sahip Flutter çerçevesi kullanılarak bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Mobil arayüz, kullanıcının sisteme fiziksel olarak erişemediği durumlarda sensör telemetrilerini takip edebilmesini ve sınırlı denetleyici müdahalelerde bulunabilmesini hedeflemektedir.

Mobil uygulama, sistem mimarisi içerisinde bağımsız bir kontrol birimi olarak değil; gömülü kontrol katmanına komut ileten bir istemci olarak konumlandırılmıştır. Kullanıcı tarafından gönderilen komutlar, MQTT protokolü üzerinden gömülü kontrol birimine birer talep (request) şeklinde iletilmektedir.

Bu taleplerin uygulanabilmesi için gömülü kontrol yazılımı aşağıdaki koşulları değerlendirmektedir:

- Sistemin geçerli çalışma modu (örneğin Manuel modun aktif olup olmadığı),
- Emniyet ve çalışma koşulları (örneğin tank seviyesinin yeterli olması).

Bu denetimler sonucunda komutlar ya yürürlüğe alınmakta ya da emniyet gerekçesiyle reddedilmektedir. Örneğin otomatik modda gönderilen manuel komutlar veya kritik seviye altındayken verilen pompa çalıştırma talepleri sistem tarafından geçersiz kılınmaktadır.

Bu yapı sayesinde mobil uygulama, kullanıcıya esnek ve güvenli bir uzaktan erişim imkânı sunarken; sistemin fiziksel güvenliği ve kontrol kararlılığı her koşulda gömülü kontrol katmanı tarafından korunmaktadır.

3.6. Veri Yönetimi ve Depolama Stratejisi

IoT tabanlı hidroponik sistemlerde bitki sağlığının izlenmesi ve sistem performansının değerlendirilmesi, yalnızca anlık sensör verilerinin görüntülenmesiyle sınırlı değildir. Bitki gelişim süreçlerinin haftalar veya aylar boyunca devam ettiği göz önüne alındığında; sıcaklık, nem, pH ve EC gibi temel parametrelerin geçmişe dönük olarak kaydedilmesi ve uzun dönemli değişim eğilimlerinin analiz edilebilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu tür veriler hem sistem davranışının doğru yorumlanmasını hem de veriye dayalı karar destek mekanizmalarının geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu doğrultuda geliştirilen sistemde, geleneksel satır-sütun tabanlı ilişkisel veri tabanları yerine, IoT uygulamalarının yüksek veri üretim hızına ve zaman bağımlı yapısına daha uygun olan Zaman Serisi Veri Tabanı (Time-Series Database, TSDB) yaklaşımı benimsenmiştir. TSDB mimarisi, sensör verilerinin zaman damgası ile verimli biçimde saklanmasına ve zamana bağlı sorguların düşük gecikme ile gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Sistemden saniyeler mertebesinde üretilen sensör verilerinin kalıcı olarak depolanması amacıyla, açık kaynak kodlu InfluxDB veri tabanı tercih edilmiştir. Bu seçimin başlıca mühendislik gerekçeleri aşağıda özetlenmektedir:

- **Yüksek Yazma Performansı:** InfluxDB, zaman damgası ile indekslenmiş verileri yüksek hızlarda ve düşük işlem yüküyle yazabilmekte; bu sayede sürekli veri akışına sahip IoT sistemlerinde performans darboğazı oluşmasını engellemektedir.
- **Veri Sıkıştırma ve Saklama Politikaları:** Büyük hacimli sensör verileri, yerleşik sıkıştırma mekanizmaları sayesinde disk alanı verimli kullanılarak saklanmaktadır. Ayrıca tanımlanabilir saklama politikaları (retention policies) ile eski verilerin otomatik olarak silinmesi veya özetlenerek tutulması mümkün olmaktadır.
- **Zamana Dayalı Etkin Sorgulama:** “Son 24 saatlik ortalama sıcaklık” veya “belirli bir zaman aralığındaki pH dalgalanmaları” gibi zamana bağlı analizler,

ilişkisel veri tabanlarına kıyasla daha hızlı ve daha düşük kaynak kullanımıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Bu mimaride InfluxDB, Node-RED entegrasyon katmanından gelen sensör verilerini kalıcı olarak saklayan ve sistemin geçmişe dönük hafızasını oluşturan temel bileşen olarak konumlandırılmıştır. Kullanıcı arayüzlerinde görüntülenen anlık verilerden farklı olarak, burada depolanan zaman serisi verileri; sistem performansının değerlendirilmesi, sensör davranışlarının izlenmesi ve bilimsel raporlama süreçleri için referans veri kaynağı niteliği taşımaktadır.

Depolanan verilerin görselleştirilmesi ve analizi amacıyla, InfluxDB ile doğal uyumluluğa sahip açık kaynaklı Grafana platformu sistem mimarisine entegre edilmiştir. Node-RED paneli ve mobil uygulama, sistemin anlık izlenmesi ve operasyonel yönetimi için kullanılırken; Grafana, geçmişe dönük veriler üzerinde trend analizi yapılmasını ve detaylı grafiklerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu ayırım sayesinde sistem hem gerçek zamanlı izleme hem de uzun dönemli analitik değerlendirme ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde bütüncül bir veri yönetim yapısına kavuşmuştur.

3.7. Katmanlar Arası Veri ve Kontrol Akışı

Bu tez kapsamında geliştirilen hidroponik sistem, algılama katmanından başlayarak kullanıcı etkileşim katmanına kadar uzanan çok katmanlı bir mimari yapı üzerine inşa edilmiştir. Önceki alt bölümlerde her bir katman kendi işlevsel sınırları içerisinde ele alınmış; bu bölümde ise sistemin bütüncül davranışını belirleyen katmanlar arası veri ve kontrol etkileşimleri özetlenmiştir.

Sistemin kararlı ve güvenli biçimde çalışabilmesi, alt katmanlardan üst katmanlara doğru akan ölçüm ve durum bilgilerinin, üst katmanlardan alt katmanlara iletilen kullanıcı taleplerini bloke etmeyecek şekilde organize edilmesine bağlıdır. Bu doğrultuda mimari yapı; bir yandan sürekli ve güvenilir veri aktarımını sağlarken, diğer yandan tüm kontrol kararlarının yerel ve emniyetli biçimde üretilmesini esas alacak şekilde tasarlanmıştır.

3.7.1. Sensörden Kullanıcıya Veri Akışı (Uplink)

Yukarı yönlü veri akışı, fiziksel ortamda meydana gelen değişimlerin algılanmasıyla başlamakta ve bu verilerin kullanıcı arayüzlerinde anlamlı biçimde sunulmasıyla tamamlanmaktadır. Bu süreç üç temel aşamada gerçekleşmektedir:

- 1. Veri Toplama ve Ön İşleme:** pH, EC, sıcaklık, nem, akış ve seviye gibi sensörlerden elde edilen ham veriler ESP32 tabanlı gömülü kontrol birimi tarafından okunmakta; temel gürültü bastırma ve birim dönüştürme işlemleri yerel olarak uygulanmaktadır.
- 2. Paketleme ve Yayınlama:** Ön işlenmiş ölçümler, sistemin aktif çalışma modu, durum bayrakları ve zaman damgası ile JSON formatında paketlenerek MQTT protokolü üzerinden yayınlanmaktadır. Bu aşamada gömülü kontrol birimi yalnızca bir veri yayıncısı (publisher) rolü üstlenmektedir.
- 3. Dağıtım ve Görselleştirme:** Yayınlanan veri paketleri Node-RED entegrasyon katmanı tarafından alınarak içeriklerine göre ayrıştırılmaktadır. Sürekli izlenmesi gereken sensör verileri zaman serisi veri tabanına kaydedilirken; aktüatör durumları, çalışma modu ve alarm bilgileri kullanıcıya anlık durum farkındalığı sağlamak amacıyla dashboard ve mobil uygulamaya yönlendirilmektedir.

Bu yapı sayesinde gömülü kontrol birimi, doğrulama gerektirmeyen asenkron iletim (fire-and-forget) prensibiyle çalışmakta; haberleşme katmanındaki gecikmeler veya bağlantı kopmaları yerel kontrol döngüsünü etkilememektedir.

3.7.2. Kullanıcıdan Aktüatöre Komut Akışı (Downlink)

Aşağı yönlü komut akışı, sensör verilerinin yukarı yönlü iletimine kıyasla daha sınırlı ve sıkı denetim altındadır. Kullanıcıdan gelen komutlar, doğrudan yürütülen emirler olarak değil; sistem tarafından değerlendirilmesi gereken talepler (request) olarak ele alınmaktadır.

Bu kapsamda kullanıcı komutları, MQTT aracılığıyla gömülü kontrol birimine iletilmekte; ESP32 üzerinde çalışan FSM tabanlı kontrol mantığı tarafından aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilmektedir:

- Sistemin aktif çalışma modu (Otomatik / Manuel),

- Mevcut emniyet ve donanımsal koşullar.

Bu denetimler sonucunda komut ya güvenli biçimde uygulanmakta ya da emniyet gerekçesiyle reddedilmektedir. Böylece kullanıcı müdahaleleri, sistemin fiziksel güvenliğini tehlikeye atmadan gerçekleştirilebilmektedir.

3.7.3. Normal Çalışma ve Emniyet Senaryolarının Ayrımı

Geliştirilen sistemde veri ve kontrol akışı, iki temel çalışma senaryosu altında ele alınmaktadır:

1. **Normal Çalışma Senaryosu:** Sistem kararlı durumdadır. Sensör verileri kural tabanlı kontrol algoritmalarıyla değerlendirilir ve aktüatör kararları otomatik olarak üretilir. Kullanıcı ağırlıklı olarak izleme konumundadır ve yalnızca izin verilen sınırlar içinde manuel müdahalelerde bulunabilir.
2. **Emniyet / Acil Durum Senaryosu:** Akış kaybı veya kritik seviye düşüşü gibi sistem güvenliğini tehdit eden durumlar algılandığında, emniyet mekanizmaları tüm diğer kontrol kararları üzerinde öncelikli hâle gelir. Bu durumda kullanıcı tarafından gönderilen komutlar dahi yazılımsal emniyet kilitleri tarafından engellenebilmektedir.

3.7.4. Mimari Bütünlüğün Değerlendirilmesi

Bu bölümde tanımlanan veri ve kontrol akış yapıları, önerilen dört katmanlı mimarinin kararlı ve emniyet odaklı bir çalışma sunduğunu ortaya koymaktadır. Mimari tasarım sayesinde:

- Haberleşme katmanındaki kesintiler yerel kontrol döngüsünü etkilememekte,
- Kullanıcı arayüzündeki hatalar aktüatör davranışlarına doğrudan yansımamakta,
- Sunucu veya ağ gecikmeleri kritik kontrol süreçlerinin hassasiyetini bozmamaktadır.

Kontrol kararlarının tamamının gömülü kontrol biriminde alınması; haberleşme ve kullanıcı etkileşim katmanlarının yalnızca izleme ve talep iletimi görevleriyle sınırlandırılması sayesinde, kapalı ortam NFT hidroponik sistemler için kritik olan

yüksek güvenilirlik, hızlı tepki süresi ve emniyetli çalışma gereksinimleri mimari düzeyde sağlanmıştır.



4. SİSTEM GERÇEKLENMESİ VE UYGULAMA

4.1. Sistem Gerçekleme Metodolojisi ve Geliştirme Ortamı

Önceki bölümlerde kavramsal çerçevesi ve mimari tasarımı sunulan IoT tabanlı hidroponik sistemin gerçekleştirme süreci; donanım, gömülü yazılım, sunucu ve mobil uygulama bileşenlerinin eş zamanlı olarak geliştirildiği bütünleşik ve aşamalı bir yaklaşımla yürütülmüştür.

Sistem tasarımında, hidroponik süreçlerin ve ağ tabanlı haberleşmenin gerektirdiği hızlı tepki verebilme (responsiveness) yeteneği kritik öneme sahiptir. Bu nedenle gömülü yazılım mimarisinde, işlemciyi belirli süreler boyunca durduran geleneksel delay() tabanlı yaklaşımlar yerine bloklamasız (non-blocking) zamanlama modeli benimsenmiştir. Bu modelde zaman yönetimi, sistem saatini referans alan millis() fonksiyonu üzerinden gerçekleştirilmekte; işlemci ana döngü içerisinde sürekli aktif tutulmaktadır.

Bu yaklaşım sayesinde, örneğin pH sensöründen kararlı bir ölçüm elde etmek için geçen bekleme süresi boyunca işlemci bloke edilmemekte; aynı anda MQTT bağlantısının canlı tutulması (keep-alive), kullanıcıdan gelebilecek komutların işlenmesi ve emniyet koşullarının denetlenmesi gibi görevler yürütülebilmektedir. Bu yapı, gerçek zamanlı işletim sistemi (RTOS) kullanılmaksızın, kooperatif çok görevlilik (cooperative multitasking) prensibi ile sistemin kararlı ve öngörülebilir biçimde çalışmasını sağlamaktadır.

Sistemin geliştirilmesi, test edilmesi ve entegrasyonunda kullanılan yazılım dilleri, kütüphaneler ve geliştirme ortamları Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Sistem geliştirme katmanları ve kullanılan temel teknolojiler.

Katman	Teknoloji / Platform	Temel İşlev
Gömülü Sistem	C++ (Arduino Framework, ESP32)	Sensör okuma, FSM tabanlı kontrol algoritmaları ve aktüatör sürme
Haberleşme	MQTT (TCP/IP)	Olay tabanlı veri iletimi (publish/subscribe)
Sunucu Katmanı	Node-RED	Veri yönlendirme, işleme ve görselleştirme
Veritabanı	InfluxDB	Zaman serisi veri depolama ve sorgulama
Mobil Uygulama	Flutter (Dart)	Uzaktan izleme ve kullanıcı komutlarının iletimi

4.2. Donanım Gerçeklemesi ve Fiziksel Kurulum

Bu bölümde, tasarlanan IoT tabanlı NFT hidroponik sistemin donanımsal gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Öncelikle sistemin mekanik konstrüksiyonu, sıvı sirkülasyon altyapısı ve çevresel kontrol düzenekleri açıklanmış; ardından elektronik bileşenlerin bu fiziksel yapı içerisine entegrasyonu ve yerleşim prensipleri sunulmuştur.

4.2.1. Mekanik Yerleşim ve Fiziksel Kurulum

Geliştirilen kapalı ortam NFT hidroponik sistemin mekanik yerleşimi; enerji verimliliği, çevresel parametrelerin dış etkenlerden izole edilebilmesi ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda tasarlanmıştır. Sistem, dış ortamla doğrudan etkileşimi minimize edilmiş bir yetiştirme kabini içerisinde çalışacak şekilde kurgulanmış; böylece sıcaklık, bağıl nem, ışık ve besin çözeltisi parametrelerinin kontrollü biçimde yönetilmesi amaçlanmıştır.

Kabin iskeleti, yeterli mekanik dayanım ve rijitlik sağlamak amacıyla çelik konstrüksiyon profilleri kullanılarak inşa edilmiştir. Kabinin dış yüzeyinde ise ısı yalıtımını artırmak ve sürdürülebilirlik yaklaşımını desteklemek amacıyla geri kazanılmış polimer tabanlı kaplama malzemeleri tercih edilmiştir. Yaklaşık 200 × 170 × 120 cm boyutlarındaki bu yapı, kendi içerisinde tam kontrollü bir mikro iklim ortamı oluşturacak biçimde tasarlanmıştır. Sistemin taşıyıcı iskelet yapısı ve yalıtılmış dış görünümü Şekil 4.1’de sunulmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.1: Mekanik kurulum: (a) Kabin dış görünümü, (b) Kabin içi yerleşim.

NFT yetiştirme altyapısı, besin çözeltisinin yerçekimi etkisiyle ince bir film tabakası hâlinde aktığı Nutrient Film Technique prensibine uygun olarak oluşturulmuştur. Kabin içerisinde üç adet paralel NFT kanalı konumlandırılmış olup, her bir kanal literatürde yaygın olarak kullanılan ölçüler dikkate alınarak 115 cm uzunluğunda ve 7,5 cm çapında PVC borular kullanılarak imal edilmiştir. Her bir kanal üzerinde altı adet bitki yerleşim yuvası açılmış ve sistem toplamda 18 bitki kapasitesine sahip olacak şekilde yapılandırılmıştır. NFT kanallarının kabin içi yerleşimi ve bitki yuvalarının fiziksel konfigürasyonu Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: NFT kanallarının kabin içi yerleşimi.

Sistemin besin çözeltisi iletim altyapısı, kapalı devre (re-circulating) çalışma prensibine göre tasarlanmıştır. Besin çözeltisi, kabinin taban kısmında konumlandırılan $40 \times 38 \times 60$ cm boyutlarındaki ana rezervuar tankında depolanmaktadır. Çözeltinin NFT kanallarına iletimi ve kanallardan geri dönen sıvının tekrar tanka kazandırılması, sirkülasyon pompası ve tahliye hatları aracılığıyla sürekli bir döngü hâlinde gerçekleştirilmektedir. Bu kapalı döngü yapısı, su ve besin maddesi kayıplarını minimize ederek sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Rezervuar tankının yerleşimi ve akış hattı bağlantı detayları Şekil 4.3'te sunulmuştur.

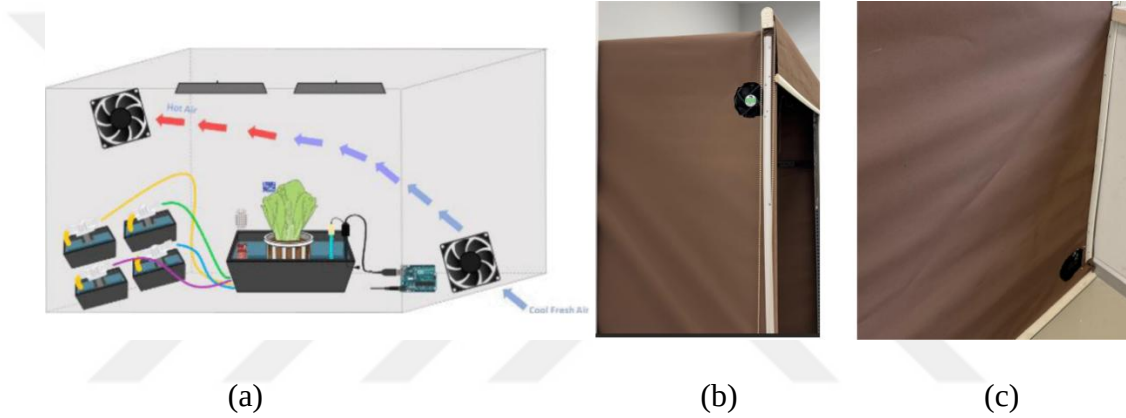


Şekil 4.3: Besin çözeltisi rezervuarı ve sirkülasyon hattı.

Kabin içi çevresel koşulların homojen biçimde sağlanması ve bitki gelişimi için gerekli gaz değişiminin (CO_2/O_2) desteklenmesi amacıyla, aktif hava sirkülasyonuna dayalı bir iklimlendirme stratejisi benimsenmiştir. Bu kapsamda temiz hava girişi (intake) ve kirli hava tahliyesi (exhaust) işlevleri, bağımsız fanlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Fanların kabin üzerindeki konumlandırılması, literatürde yer alan doğal konveksiyon prensibi —ısıyan havanın yükselmesi— esas alınarak belirlenmiştir [3]. Buna göre, dış ortamdan alınan daha serin ve taze havanın kabine dahil edilmesi için giriş fanı kabinin alt seviyesine yerleştirilmiş; kabin içerisinde ısınarak yükselen nemli havanın

etkin biçimde uzaklaştırılması amacıyla egzoz fanı üst ve çapraz bir noktaya konumlandırılmıştır.

Bu yerleşim sayesinde hava akışı, kabin içerisinde aşağıdan yukarıya doğru doğal bir diyagonal hat izlemekte ve durağan hava ceplerinin (dead zones) oluşumu büyük ölçüde engellenmektedir. Mekanik altyapı ile uyumlu olarak, yazılım katmanında uygulanan sıcaklık ve nem eşiklerine dayalı histerezis (ölü bant) kontrol mantığı, fanların gereksiz yere sık devreye girip çıkmasını önleyerek sistemin kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır. Hava akış tasarım prensibi ve gerçekleştirilen fiziksel montaj detayları Şekil 4.4'te sunulmaktadır.



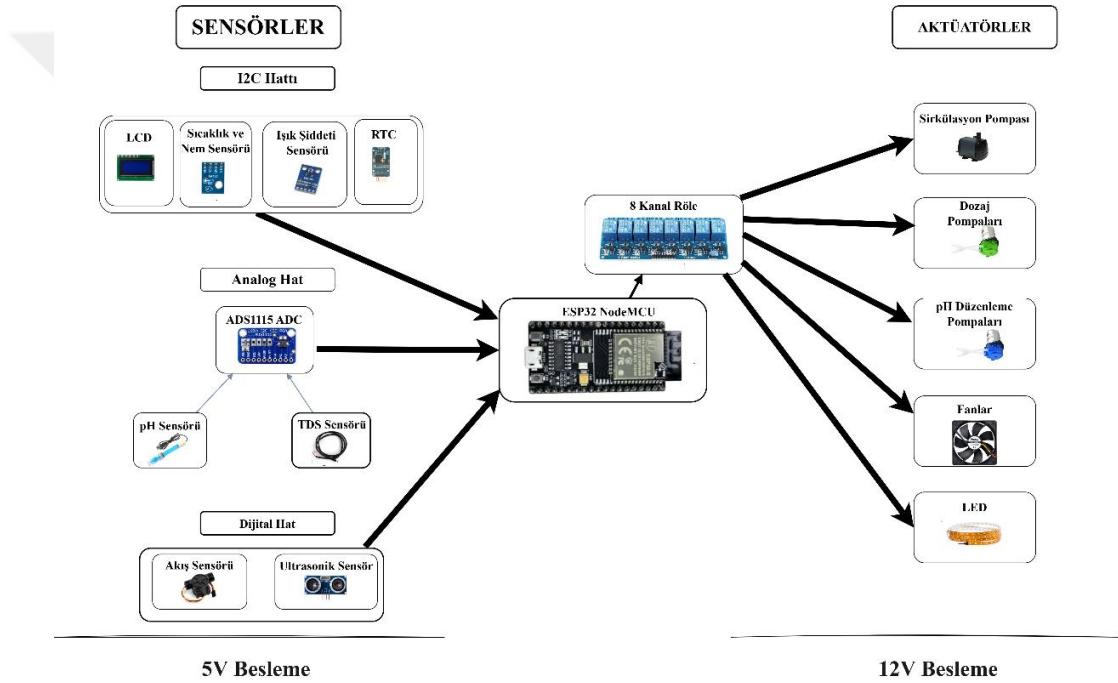
Şekil 4.4: Kabin içi hava akışı ve fan yerleşimi [3].

4.2.2. Elektronik Donanım Mimarisi ve Elektriksel Entegrasyon

Mekanik kurulumu tamamlanan sistemin elektronik altyapısı; hidroponik ortamların doğası gereği sahip olduğu yüksek bağıl nem, kimyasal korozyon riski ve motor, pompa ve valf gibi endüktif yüklerin oluşturduğu elektromanyetik girişimler (EMI) dikkate alınarak tasarlanmıştır. Elektronik donanımın gerçekleşmesinde temel hedef, ölçüm hassasiyetini koruyan, bakım ve genişletilebilirlik açısından modüler, aynı zamanda uzun süreli çalışmaya uygun güvenilir bir yapı oluşturmaktır.

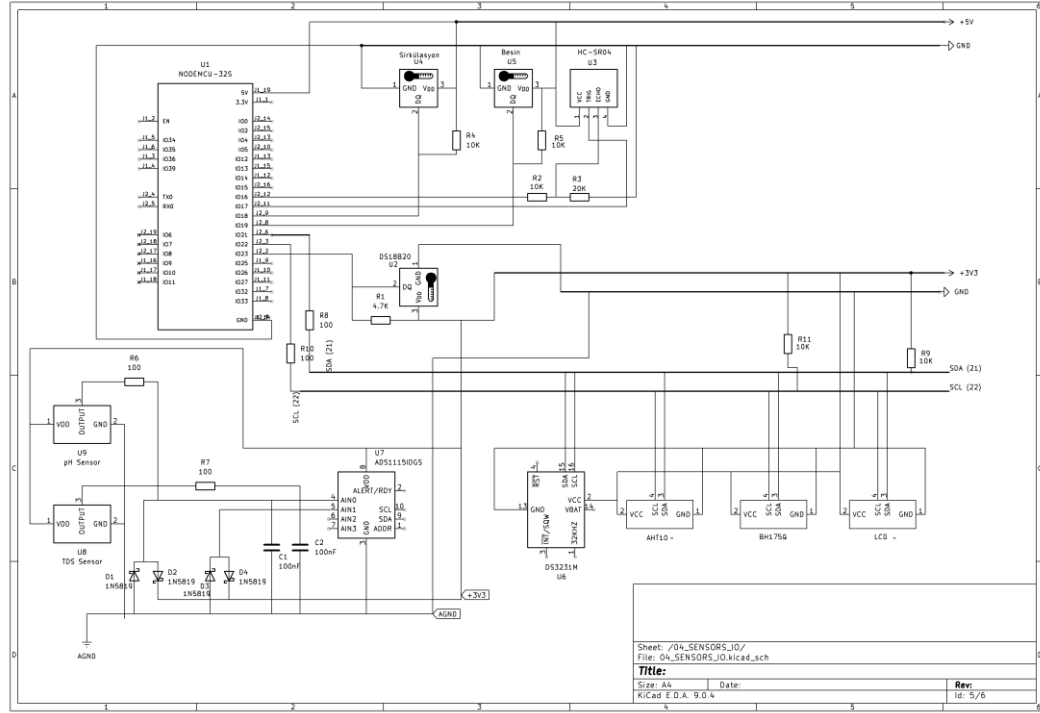
Bu doğrultuda sistemin elektriksel entegrasyonu; mimari tasarım, devre topolojisi, fiziksel pano yerleşimi, sensör arayüzleri ve yazılım–donanım eşleşmesi olmak üzere aşamalı bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Sistemin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla, tasarımın ilk aşamasında gürültü üreten güç ve aktüatör bileşenleri ile hassas ölçüm yapan algılama birimlerinin elektriksel olarak ayrıştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda sistem kontrolcüsü olan ESP32 merkezde konumlandırılarak yıldız bağlantı topolojisine (star topology) dayalı bir mimari oluşturulmuştur. Bu yapıda, yüksek akım çeken aktüatör grupları ile düşük seviyeli analog ve dijital sensör sinyalleri ayrı besleme ve sinyal yolları üzerinden yönetilmekte; motorların kalkış anında oluşturduğu ani gerilim dalgalanmalarının ve gürültünün ölçüm doğruluğunu etkilemesi önlenmektedir. Sensör ve aktüatör gruplarının elektriksel ayrımını gösteren genel sinyal akışı Şekil 4.5’te sunulmuştur.



Şekil 4.5: Sensör ve aktüatörler için yıldız bağlantı topolojisi.

Belirlenen mimariye uygun olarak sistemin detaylı elektriksel bağlantıları açık devre şeması düzeyinde tasarlanmıştır. Devre tasarımında sinyal bütünlüğünü korumak amacıyla, I²C veri yolu üzerinde uygun değerlerde pull-up dirençleri kullanılmış; analog ölçüm hatlarında yüksek frekanslı gürültüyü bastırmaya yönelik filtreleme kapasitörleri eklenmiş; endüktif yüklerin oluşturduğu ters elektromotor kuvvetin (back-EMF) bastırılması için ise koruma diyotları devreye dahil edilmiştir. ESP32 tabanlı kontrol birimi ile çevresel bileşenler arasındaki pin bazlı bağlantıları gösteren açık devre şeması Şekil 4.6’da verilmiştir.



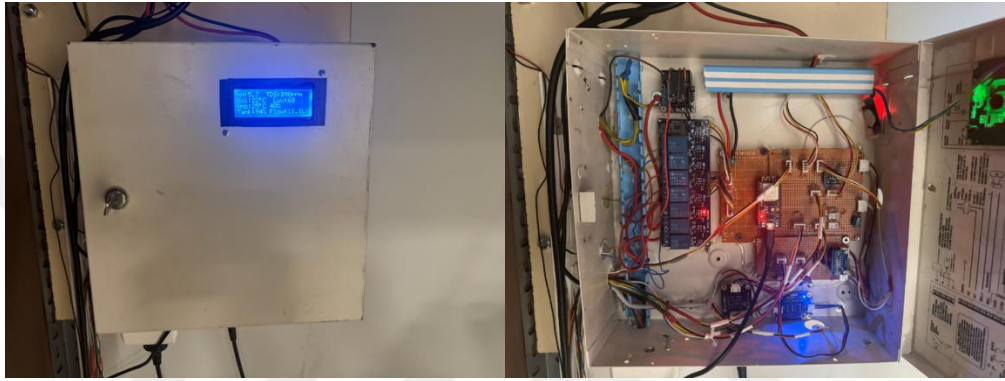
Şekil 4.6: ESP32 tabanlı kontrol birimi açık devre şeması.

Sistemin işletme güvenliğini artırmak ve bakım süreçlerini kolaylaştırmak amacıyla, elektronik montaj fiziksel olarak izole edilmiş iki ayrı pano içerisinde gerçekleştirilmiştir. Güç Dağıtım Panosu ve Ana Kontrol Panosu olarak adlandırılan bu yapı, çift pano (dual-enclosure) mimarisi prensibine dayanmaktadır. Güç Dağıtım Panosu, şebeke gerilimini (220 V AC) sistemin ihtiyaç duyduğu doğru akım seviyelerine dönüştürmekte; 12 V DC hattı endüktif yükler için, 5 V DC hattı ise lojik ve algılama devreleri için ayrı ayrı dağıtmaktadır. Bu fiziksel ayırım, adaptörlerin ve güç dönüştürücülerin oluşturduğu ısının hassas kontrol devrelerine iletilmesini engellemektedir.

Ana Kontrol Panosu içerisinde ise ESP32 mikrodenetleyicisi, 8 kanallı röle modülü, pH ve TDS sensörlerine ait sinyal dönüştürücü kartlar ve koruma devreleri yer almaktadır. Röle modülünde optokuplör izolasyonu etkinleştirilerek, motor ve pompa gibi yüklerin anahtarlanması sırasında oluşan elektriksel gürültünün mikrodenetleyiciye ulaşması önlenmiştir. Her iki panonun fiziksel yerleşimi Şekil 4.7’de sunulmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.7: Elektriksel montaj panoları: (a) Güç, (b) Kontrol.

Kontrol panosu içerisinde yer alan sensör arayüzleri, ölçüm hassasiyetini ve sensör ömrünü koruyacak şekilde yapılandırılmıştır. LCD ekran, gerçek zaman saati (RTC), AHT10 sıcaklık-nem sensörü ve BH1750 ışık sensörü, ortak bir I²C veri yolu üzerinden ESP32'ye bağlanmıştır. pH ve TDS sensörlerinin ürettiği milivolt seviyesindeki analog sinyaller ise, ESP32'nin dahili ADC biriminin sınırlı çözünürlüğü ve doğrusallık hataları nedeniyle doğrudan okunmamış; bunun yerine 16-bit çözünürlüğe sahip harici ADS1115 analog-sayısal dönüştürücü modülü kullanılmıştır. Sistem güvenliği açısından kritik öneme sahip akış sensörü ise, anlık veri kaybını önlemek amacıyla kesme (interrupt) tabanlı bir girişe bağlanmıştır.

Hidroponik sistemlerde aynı besin çözeltisi içerisinde çalışan pH ve iletkenlik (TDS) sensörleri arasında elektriksel etkileşim problemleri sıklıkla gözlemlenmektedir. TDS sensörünün iletkenlik ölçümü sırasında sıvıya uyguladığı elektriksel uyarımlar, yüksek empedanslı pH probunun ölçüm devresini etkileyerek hatalı okumalara neden olabilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla, sistemde pahalı galvanik izolatörler

yerine yazılım ve donanımın birlikte çalıştığı sıralı ölçüm (sequential sensing) yaklaşımı benimsenmiştir.

Bu kapsamda sensörlerin besleme hatları, yüksek taraf anahtarlama (high-side switching) topolojisi kullanılarak kontrol edilmiştir. P-kanal güç MOSFET'i (IRF9540N) ve onu süren N-kanal sinyal MOSFET'i (2N7000) yardımıyla, pH ve TDS sensörleri mikrodenetleyici tarafından belirlenen zaman aralıklarında sırayla aktif hâle getirilmiştir. Sensör kapatıldığında hatta kalan yükün hızlıca sönmülmesi amacıyla deşarj (bleeder) dirençleri eklenmiş; böylece sensörler yalnızca kendi ölçüm periyotlarında çalışarak birbirlerini elektriksel olarak etkilemez hâle getirilmiştir.

Son olarak, yazılım mimarisi ile donanım arasındaki birebir eşleşmenin sağlanması amacıyla ESP32 mikrodenetleyicisine ait pin atamaları sistematik biçimde tanımlanmıştır. Sensör ve haberleşme birimlerine ait pin yapılandırmaları Tablo 4.2'de, aktüatörlerin 8 kanallı röle modülü üzerindeki dağılımı ise Tablo 4.3'te sunulmuştur. Bu yapı, sistemin tekrar üretilebilirliğini ve ileride yapılabilecek donanım güncellemelerini kolaylaştırmaktadır.

Tablo 4.2: ESP32 mikrodenetleyicisi pin bağlantı haritası.

Bileşen / Modül	Arayüz	ESP32 Pin(leri)	Temel İşlev
I ² C Hattı (LCD, RTC, AHT10, BH1750, ADS1115)	I ² C Bus	GPIO 21 (SDA), GPIO 22 (SCL)	Çoklu çevresel birim haberleşmesi.
YF-S201	Dijital (Interrupt)	GPIO 34	Sirkülasyon debi ölçümü
DS18B20	OneWire	GPIO 4	Besin çözeltisi sıcaklık ölçümü
HC-SR04	Dijital IO	Trig: GPIO 5 Echo: GPIO 18	Ultrasonik tank seviye ölçümü
pH Sensörü Güç Hattı	Dijital Çıkış	GPIO 19	Sensör besleme kontrolü (MOSFET)
TDS Sensörü Güç Hattı	Dijital Çıkış	GPIO 23	Sensör besleme kontrolü (MOSFET)

Tablo 4.3: 8 kanallı röle modülü aktüatör kontrol listesi.

Röle Kanalı	Aktüatör	Besleme Gerilimi	Temel İşlev
IN 1	LED Aydınlatma	12 V DC	Fotoperiyot tabanlı aydınlatma
IN 2	Giriş Fanı	12 V DC	Taze hava girişi
IN 3	Çıkış Fanı	12 V DC	Isı ve nem tahliyesi
IN 4	Sirkülasyon Pompası	12 V DC	NFT besin dolaşımı
IN 5	A Besin Pompası	12 V DC	A çözeltisi dozajı
IN 6	B Besin Pompası	12 V DC	B çözeltisi dozajı
IN 7	pH Yükseltici Pompa	12 V DC	Bazik çözelti dozajı
IN 8	pH Düşürücü Pompası	12 V DC	Asidik çözelti dozajı

4.3. Gömülü Yazılım Mimarisi (ESP32 Firmware)

Geliştirilen sistemin gömülü yazılımı, Arduino IDE tümleşik geliştirme ortamı kullanılarak, C++ tabanlı Arduino Framework altyapısı üzerinde ESP32 mikrodenetleyicisi için gerçekleştirilmiştir. Yazılım mimarisi; bakım kolaylığının artırılması, kodun okunabilirliğinin iyileştirilmesi ve ileride yapılabilecek fonksiyonel genişletmelere olanak sağlanması amacıyla, monolitik programlama yaklaşımı yerine modüler bir yapı temel alınarak tasarlanmıştır.

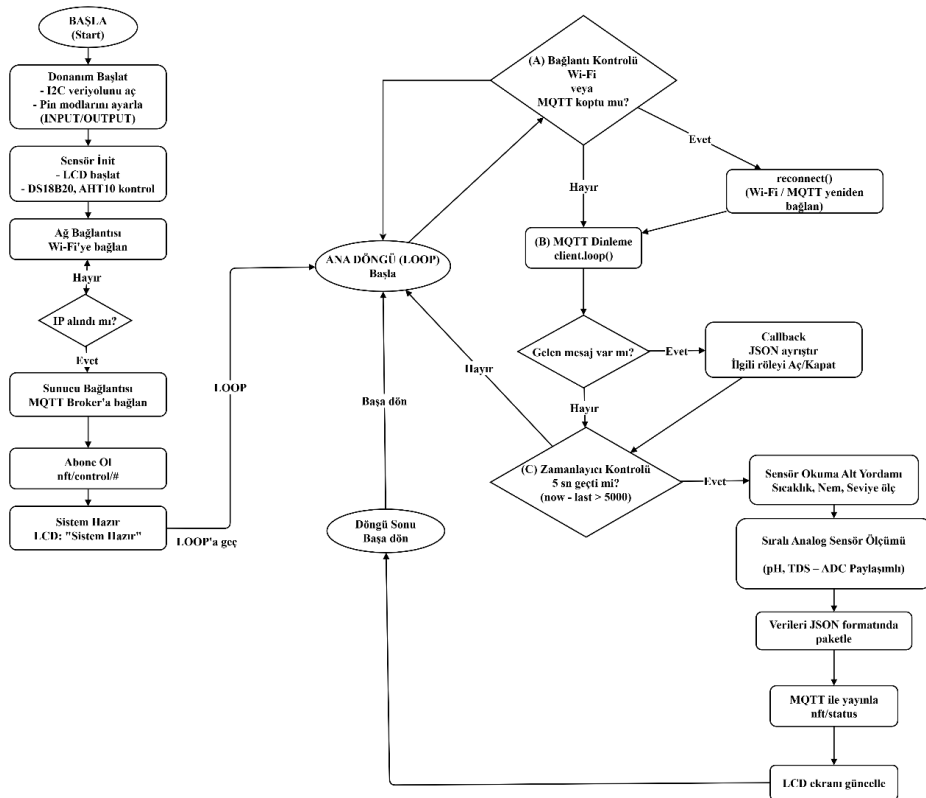
Bu doğrultuda sistem yazılımı, tüm fonksiyonların tek bir dosyada toplandığı geleneksel yapıdan ayrılarak; sensör okuma, haberleşme, kontrol mantığı ve kullanıcı arayüzü gibi işlevsel sorumluluklara göre ayrıştırılmış bağımsız yazılım modüllerinden oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, hem yazılımın bakım ve hata ayıklama süreçlerini kolaylaştırmakta hem de donanım veya sensör değişikliklerinin sistem geneline etkisini sınırlamaktadır.

Sistemin kararlı ve kesintisiz çalışmasını sağlamak amacıyla, ana döngü (main loop) içerisinde işlemciyi bloke eden zaman gecikmeli komutların (örneğin delay()) kullanımından özellikle kaçınılmıştır. Bunun yerine, tüm zamanlama gereksinimleri sistem saatine dayalı olarak millis() fonksiyonu aracılığıyla gerçekleştirilmiş; sensör okuma, veri iletimi ve kontrol kararları birbirinden bağımsız zamanlayıcılar üzerinden

yürütülmüştür. Bu yapı sayesinde yazılım, tek döngülü bir çalışma ortamı içerisinde eşzamanlıya yakın (pseudo-parallel) bir yürütme karakteri sergilemektedir.

Yazılımın kontrol mimarisi, sistemin çalışma modlarını esas alan FSM (Finite State Machine) tabanlı bir yapı üzerine inşa edilmiştir. Bu yaklaşımda, sistemin hangi çalışma modunda bulunduğu açık biçimde tanımlanmakta; sensör okuma, haberleşme ve aktüatör sürme işlemleri yalnızca aktif moda karşılık gelen kontrol mantığı çerçevesinde yürütülmektedir. FSM tabanlı bu yapı, yazılımın deterministik ve öngörülebilir bir davranış sergilemesini sağlarken; aynı zamanda manuel müdahaleler ile otomatik kontrol algoritmaları arasında oluşabilecek çatışmaları da yazılımsal olarak engellemektedir.

Sistemin açılış (setup) aşamasından başlayarak sonsuz döngü (loop) içerisindeki temel kontrol ve veri akışını özetleyen genel yazılım mimarisi, Şekil 4.8’de sunulmuştur. Bu akış diyagramında; donanım başlatma adımları, Wi-Fi ve MQTT bağlantı süreçleri, ana döngü içerisindeki bağlantı kontrolü, MQTT mesaj dinleme işlemleri ve zamanlayıcı tabanlı sensör okuma görevleri bütüncül bir yapı içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Gömülü sistem kontrol döngüsü ve veri akışı.

4.3.1. Modüler Kod Organizasyonu ve Dosya Yapısı

Gömülü yazılımın sürdürülebilirliğini sağlamak, hata ayıklama süreçlerini kolaylaştırmak ve kodun yeniden kullanılabilirliğini artırmak amacıyla, bu çalışmada Sorumlulukların Ayrımı (Separation of Concerns – SoC) prensibine dayalı modüler bir yazılım organizasyonu benimsenmiştir. Bu kapsamda, sistemin farklı işlevsel görevlerini üstlenen yazılım bileşenleri mantıksal modüller hâlinde ayrıştırılmıştır.

Arduino IDE proje yapısı içerisinde, sistemin ana kontrol akışı .ino uzantılı ana dosyada tanımlanırken; sensör okuma işlemleri, haberleşme altyapısı, kontrol algoritmaları ve kullanıcı arayüzü fonksiyonları ayrı .h (başlık) ve .cpp (kaynak) dosyaları içerisinde yapılandırılmıştır. Başlık dosyaları, ilgili modüllerin dış dünyaya sunduğu fonksiyon arayüzlerini tanımlarken; kaynak dosyaları bu fonksiyonların uygulama detaylarını içermektedir.

Bu modüler yapı sayesinde, sensör okuma veya donanım etkileşimine ilişkin bir bileşende yapılan değişiklikler sistemin ana kontrol döngüsünü doğrudan etkilememekte; yazılım mimarisi donanım bağımlılıklarından büyük ölçüde ayrıştırılmış, esnek ve genişletilebilir bir karakter kazanmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin farklı sensör veya aktüatör konfigürasyonlarına uyarlanmasını da kolaylaştırmaktadır.

Projede oluşturulan temel yazılım modülleri, dosya türleri ve bu modüllerin üstlendikleri işlevsel görevler Tablo 4.4’te özetlenmiştir.

Tablo 4.4: Gömülü yazılım dosya yapısı ve görev dağılımı.

Dosya Adı	İşlevsel Görevi ve Sorumluluğu
Hydroponic_System.ino	Sistem başlangıcı (setup) ve bloklamasız ana döngünün (loop) yönetimi
config.h / .cpp	Pin atamaları, kalibrasyon parametreleri ve kontrol eşikleri
secrets.h	Wi-Fi ve MQTT kimlik bilgilerinin güvenli saklanması
mqtt.h / .cpp	Wi-Fi/MQTT haberleşmesi, veri yayını ve komut ayrıştırma
sensors.h / .cpp	Sensör verilerinin okunması ve fiziksel büyüklüklere dönüştürülmesi
system.h / .cpp	FSM tabanlı kontrol mantığı ve aktüatör yönetimi
ui.h / .cpp	LCD tabanlı kullanıcı arayüzü ve durum gösterimi

4.3.2. Ana Döngü ve Bloklamasız (Non-blocking) Zamanlama

Hidroponik sistemin zaman duyarlı ve kararlı bir şekilde çalışabilmesi için, gömülü yazılımın ana döngü içerisinde herhangi bir noktada kilitlenmemesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle sistem yazılımında, işlemci kaynaklarını bloke eden delay() benzeri zaman gecikmeli fonksiyonlar yerine, sistem zamanını izleyen millis() sayacına dayalı bloklamasız ve zaman tabanlı bir görev zamanlama yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yapı, tek bir ana döngü içerisinde birden fazla görevin zaman paylaşımlı (time-slicing) biçimde yürütülmesine olanak tanımaktadır.

Ana döngü (loop) içerisinde sürekli veya periyodik olarak yürütülen temel görevler ve bunlara ait zamanlama stratejileri aşağıda özetlenmiştir:

4.3.2.1. Haberleşme Yığını Yönetimi (client.loop)

Bu fonksiyon, ana döngünün her iterasyonunda çağrılarak MQTT haberleşme altyapısının aktif kalmasını sağlamaktadır. Görevi yalnızca veri alımı ile sınırlı olmayıp; TCP/IP yığınının canlı tutulması, MQTT Broker ile bağlantının sürdürülmesi için gerekli keep-alive mekanizmalarının işletilmesi ve gelen abonelik mesajlarının tampon bellekten okunarak ilgili geri çağırım (callback) fonksiyonlarına yönlendirilmesini kapsamaktadır. Bu fonksiyonun düzenli olarak çağrılmaması durumunda istemci tarafı ağ bağlantısını kaybederek çevrimdışı (offline) duruma geçebilmektedir.

4.3.2.2. Veri Paketleme ve Yayınlama Rutini

Belirli zaman aralıklarında (örneğin her 3 saniyede bir) tetiklenen bu rutin, farklı sensörlerden elde edilen ölçüm verilerini (sıcaklık, nem, pH ve TDS gibi) tek bir veri yapısı altında toplamaktadır. Ölçümler, güvenli biçimlendirme yöntemleri kullanılarak standart bir JSON veri paketi hâline getirilmekte ve MQTT altyapısı üzerinden tek bir mesaj olarak yayınlanmaktadır. Bu yaklaşım, ağ trafiğini minimize ederken ölçüm verilerinin zamansal bütünlük içerisinde iletilmesini sağlamaktadır.

4.3.2.3. Emniyet ve Alarm Denetim Rutini

Sistemin güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla, daha uzun periyotlarla (örneğin her 5 saniyede bir) yürütülen bu kontrol rutini, kritik sensör verilerini yapılandırma

dosyasında tanımlı sınır değerlerle karşılaştırmaktadır. Akışın durması, sıcaklık veya nem değerlerinin güvenli aralıkların dışına çıkması gibi anormal durumlar tespit edildiğinde, sistemin durum bayrakları güncellenmekte ve ilgili uyarı mesajları MQTT üzerinden üst katmanlara iletilmektedir. Bu sayede sistem, olası arızalara karşı erken uyarı mekanizmaları ile donatılmış olmaktadır.

Bu bloklamasız zamanlama yapısının genel çalışma mantığı, sözde kod (pseudo-code) biçiminde Şekil 4.9'da özetlenmiştir.

```
/* ANA DÖNGÜ (Main Loop)
 * İşlev: delay() kullanmadan görevleri asenkron olarak zamanlar.
 */

// Zamanlayıcı Sayaçları
unsigned long lastPublishTime = 0;
unsigned long lastSafetyCheck = 0;

void loop() {
  // 1. HABERLEŞME KATMANI (Kritik - Sürekli Çalışır)
  // Wi-Fi veya MQTT bağlantısı koptuysa onar
  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }
  // Gelen paketleri dinle ve Keep-Alive sinyali gönder
  client.loop();

  // Sistemin o anki çalışma süresini al (Time Slicing için)
  unsigned long now = millis();

  // 2. VERİ YAYINLAMA (Periyodik: Örn. Her 3 Saniyede Bir)
  // Sabitler config.h dosyasından çekilir (SENSOR_PUBLISH_INTERVAL)
  if (now - lastPublishTime >= SENSOR_PUBLISH_INTERVAL) {
    lastPublishTime = now;

    // Sensörleri oku, JSON paketle ve MQTT ile gönder
    publishAllSensorsJSON();
  }

  // 3. EMNİYET VE ALARM DENETİMİ (Periyodik: Örn. Her 5 Saniyede Bir)
  if (now - lastSafetyCheck >= SAFETY_CHECK_INTERVAL) {
    lastSafetyCheck = now;

    // Akış sensörü ve sıcaklık limitlerini kontrol et
    checkAndSendWarnings();
  }
}
```

Şekil 4.9: Bloklamasız zamanlama yapısı.

Bu bölümde açıklanan bloklamasız ana döngü ve zamanlama altyapısı, sistemin farklı çalışma modlarında (Otomatik, Manuel ve Kalibrasyon) aynı yazılım çekirdeği üzerinde kararlı ve öngörülebilir biçimde çalışmasını mümkün kılmaktadır. Sensör izleme, haberleşme ve kontrol görevleri; gerçek paralellik içermemekle birlikte, tek bir ana döngü içerisinde zaman paylaşımlı ve bloklamasız bir çalışma modeliyle yürütülmektedir. Bu sayede otomatik kontrol algoritmaları, kullanıcı tarafından tetiklenen manuel müdahaleler ve kalibrasyon işlemleri arasında yazılımsal çatışmaların önüne geçilmektedir.

4.3.3. FSM (Sonlu Durum Makinesi) Tabanlı Kontrol Yapısı

Gömülü sistemin kararlı, öngörülebilir ve emniyetli bir yapıda çalışmasını sağlamak; aynı zamanda farklı çalışma modlarına ait kontrol süreçlerini açık ve yönetilebilir hâle getirmek amacıyla, sistemin kontrol mimarisi Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine – FSM) tabanlı bir yaklaşımla tasarlanmıştır. FSM yaklaşımı, sistemin yalnızca aktif çalışma moduna karşılık gelen kontrol mantığını yürütmesini sağlayarak, yazılımsal çatışmaların ve istenmeyen mod geçişlerinin önüne geçmektedir.

Bu çalışmada kullanılan FSM yapısı, sistemin çalışma modlarını temsil eden durumların bir durum değişkeni üzerinden izlenmesi ve ana kontrol döngüsü içerisinde durum kontrollü (state-driven) bir akışın işletilmesi esasına dayanmaktadır. FSM mimarisi, gömülü yazılım içerisinde durum seçici (switch–case) tabanlı bir kontrol yapısı ile gerçekleştirilmiştir.

Sistemin çalışma modları, system.h başlık dosyasında tanımlanan SystemMode adlı numaralandırılmış veri yapısı (enum) aracılığıyla temsil edilmektedir. Ana döngü içerisinde periyodik olarak çağrılan system_run() fonksiyonu, o an aktif olan FSM durumuna karşılık gelen kontrol algoritmasını devreye almaktadır. Bu yapı sayesinde her çalışma modu kendi sorumluluk alanı içerisinde izole edilmekte; bir modda yürütülen işlemlerin diğer modların işleyişini etkilemesi engellenmektedir.

FSM tabanlı bu kontrol yaklaşımı, otomatik kontrol algoritmalarının, kullanıcı tarafından tetiklenen manuel müdahalelerin ve sensör kalibrasyon süreçlerinin aynı yazılım altyapısı üzerinde emniyetli ve kontrollü bir biçimde yönetilmesini mümkün

kılmaktadır. Sistemin çalışma modları ve bu modlar arasındaki geçiş ilişkileri, Şekil 4.10’da sunulan diyagramda görsel olarak özetlenmiştir.

```
/* FSM KONTROL MANTIĞI
 * Dosya: system.cpp / system.h
 * İşlev: Sistemin çalışma modunu (Oto/Manuel/Kalibrasyon) yönetir.
 */

// Mod Tanımları (Enumeration)
enum SystemMode {
    MODE_AUTO,           // Otomatik Sensör Kontrolü
    MODE_MANUAL,         // Kullanıcı/MQTT Kontrolü
    MODE_CALIBRATION,    // Sensör Bakım Modu
    MODE_ERROR           // Hata/Acil Durum Modu
};

// Varsayılan Başlangıç Modu
SystemMode currentMode = MODE_AUTO;

void system_run() {
    switch (currentMode) {
        case MODE_AUTO:
            runAutoLogic();    // Sensörleri oku, pompaları yönet
            break;

        case MODE_MANUAL:
            // Otomatik kararları ez (Bypass), sadece komut bekle
            runManualLogic();
            break;

        case MODE_CALIBRATION:
            stopAllActuators(); // Güvenlik Kilidi (Interlock)
            // Sadece sensör okumaya devam et, dozajlama yapma
            break;
    }
}
```

Şekil 4.10: FSM tabanlı kontrol mantığı.

4.3.3.1. Otomatik Mod (MODE_AUTO)

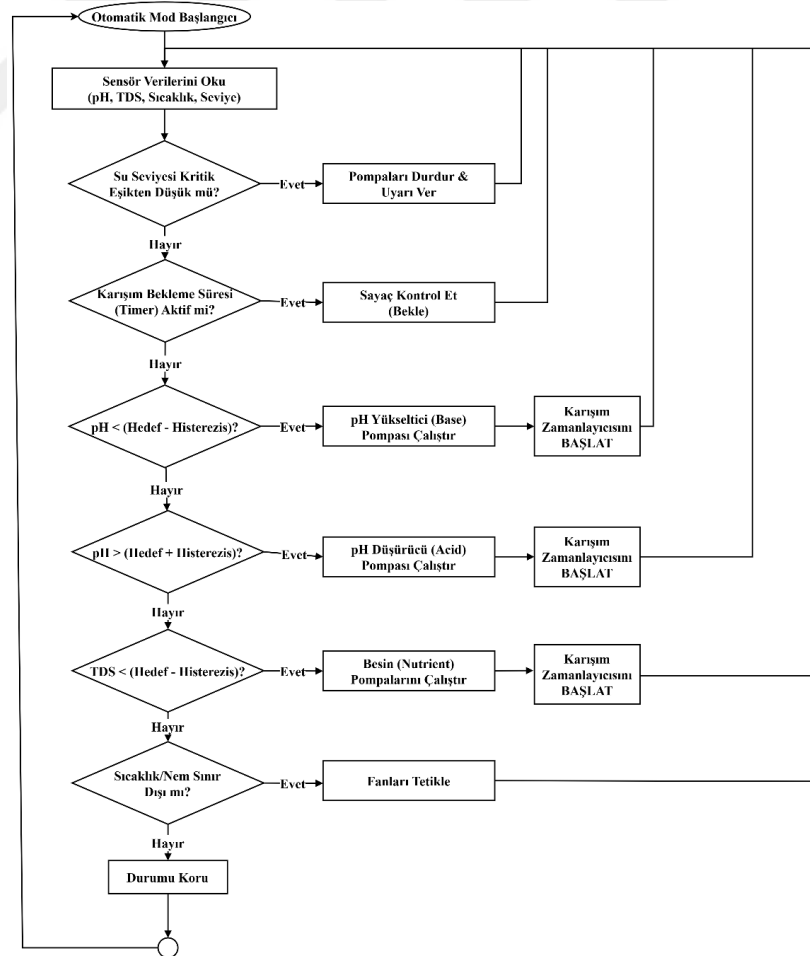
Otomatik modda sistem, emniyet öncelikli ve kural tabanlı bir karar akışı çerçevesinde otonom olarak çalışmaktadır. Şekil 4.11’de sunulan karar akışında, ilk olarak sistem güvenliğini doğrudan etkileyen koşullar değerlendirilmekte; besin tankı seviyesinin kritik eşik değerinin altına düşmesi durumunda tüm dozaj pompaları devre dışı bırakılarak kullanıcıya uyarı mesajı iletilmektedir. Bu yaklaşım, yetersiz sıvı koşullarında hatalı dozajlama yapılmasını önlemektedir.

Emniyet kontrollerinin ardından, daha önce gerçekleştirilen bir dozaj işlemi sonrasında besin çözeltisinin homojen hâle gelmesi için tanımlanan karışım bekleme süresi denetlenmektedir. Bu süre boyunca yeni bir dozaj veya kontrol kararı alınmamakta; sistem ölçüm döngüsünü pasif olarak sürdürmektedir. Bu yapı, sensör okumalarının kararsızlaşmasını ve ardışık gereksiz dozaj işlemlerini engellemektedir.

Kimyasal kontrol aşamasında pH ve TDS değerleri, histerezis (ölü bant) mantığı kullanılarak değerlendirilmektedir. pH değerinin hedef aralığın altına düşmesi durumunda pH yükseltici (baz) pompası; hedef aralığın üzerine çıkması durumunda ise pH düşürücü (asit) pompası kontrollü biçimde devreye alınmaktadır. Benzer şekilde, TDS değerinin hedef seviyenin altına düşmesi hâlinde besin dozaj pompaları çalıştırılmaktadır. Histerezis kullanımı sayesinde ölçüm gürültüsüne bağlı hızlı açma-kapama (chattering) problemlerinin önüne geçilmektedir.

Otomatik modun son aşamasında, ortam sıcaklığı ve nem değerlerinin belirlenen sınırların dışına çıkması durumunda havalandırma fanları tetiklenmektedir. Hiçbir kontrol koşulunun sağlanmadığı durumlarda ise sistem, mevcut aktüatör durumlarını değiştirmeden bir sonraki ölçüm döngüsünü beklemektedir. Bu yapı, otomatik modda sistem davranışının kararlı ve öngörülebilir biçimde sürdürülmesini sağlamaktadır.

Otomatik moda ait ayrıntılı karar ve kontrol akışı, Şekil 4.11’de sunulmuştur.



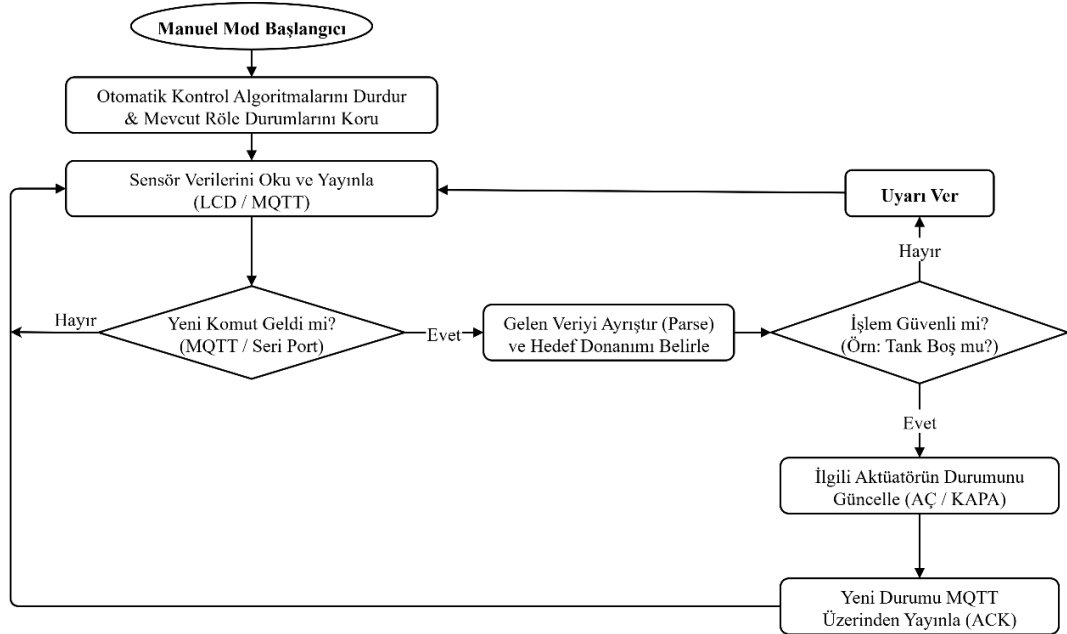
Şekil 4.11: Otomatik mod karar akış diyagramı.

4.3.3.2. Manuel Mod (MODE_MANUAL)

Manuel mod, kullanıcının mobil uygulama veya harici bir arayüz üzerinden sistem üzerindeki aktüatörleri doğrudan kontrol edebildiği çalışma modudur. Bu moda geçildiğinde otomatik kontrol algoritmaları yazılımsal olarak devre dışı bırakılmakta; kontrol yetkisi FSM tarafından izin verilen sınırlar dâhilinde kullanıcıdan gelen komutlara öncelikli hâle getirilmektedir.

Bu modda MQTT haberleşme altyapısı veya seri iletişim arayüzü üzerinden alınan komut paketleri ayrıştırılmakta; hedeflenen donanım birimi belirlenerek ilgili aktüatör, sistemin genel emniyet koşulları ihlal edilmediği sürece tetiklenmektedir. Otomatik eşik denetimleri devre dışı bırakılmış olsa dahi, kritik emniyet kontrolleri (örneğin düşük tank seviyesi) manuel modda da aktif kalmaktadır.

Her bir manuel komutun yürütülmesinin ardından aktüatörün güncel durumu, MQTT üzerinden durum mesajı (ACK) olarak yayınlanmakta ve üst katman kullanıcı arayüzleri ile sistem durumu senkronize edilmektedir. Manuel modun olay güdümlü kontrol yapısı ve geri bildirim mekanizması, Şekil 4.12’de sunulan akış diyagramında gösterilmiştir.



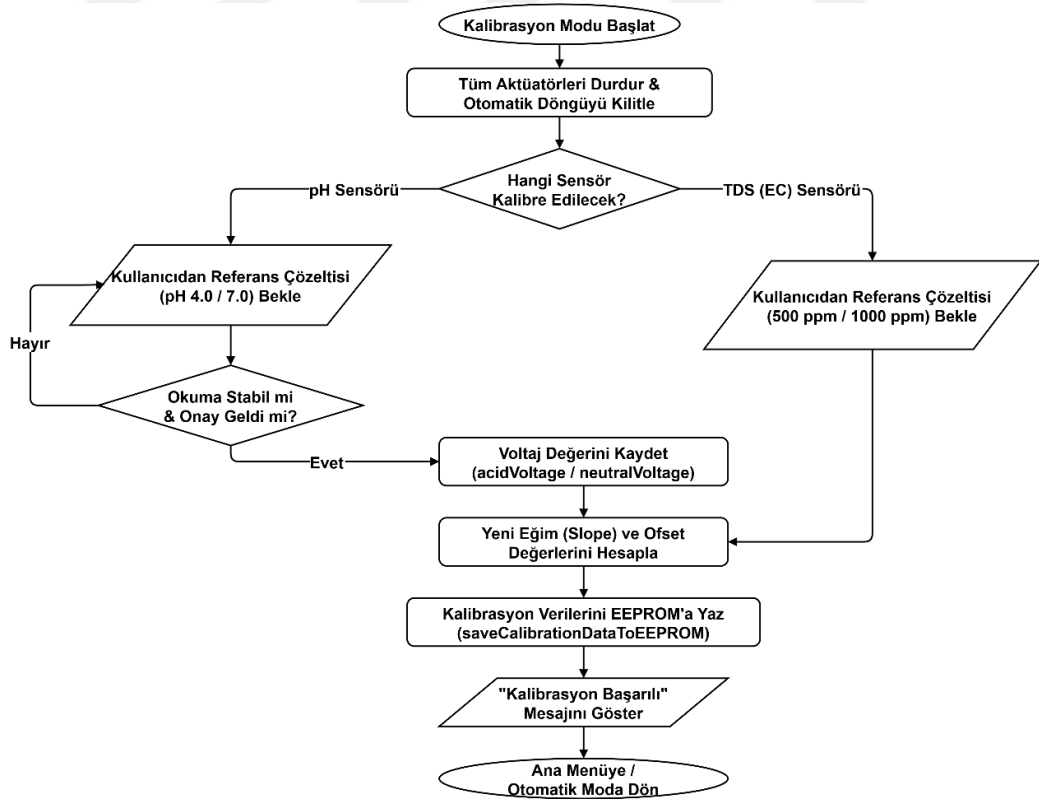
Şekil 4.12: Manuel mod ve uzaktan komut işleme akışı.

4.3.3.3. Kalibrasyon Modu (MODE_CALIBRATION)

Kalibrasyon modu, pH ve TDS sensörlerinin periyodik bakım ve kalibrasyon işlemlerinin güvenli biçimde gerçekleştirildiği özel bir çalışma modudur. Bu modda sensörler, bilinen referans çözeltilerine daldırılarak ölçüm karakteristiklerinin yeniden ayarlanması sağlanmaktadır.

Kalibrasyon sırasında elde edilen ölçüm değerleri sistemin normal çalışma aralıklarının dışına çıkabildiğinden, bu modda otomatik ve manuel kontrol algoritmaları yazılımsal olarak devre dışı bırakılmaktadır. FSM tarafından etkinleştirilen yazılımsal emniyet kilidi (software interlock) ile tüm aktüatörler zorla pasif duruma alınmakta ve fiziksel çıktılar engellenmektedir.

Bu yapı sayesinde kalibrasyon işlemleri sırasında hatalı dozajlama, istenmeyen aktüatör tetiklemeleri ve donanımsal riskler ortadan kaldırılmakta; sensör ayarlamaları güvenli, kontrollü ve tekrarlanabilir bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Kalibrasyon moduna ait işlem adımları ve emniyet kilidi yapısı, Şekil 4.13'te sunulmuştur.



Şekil 4.13: Kalibrasyon modu ve emniyet kilidi akışı.

4.4. Haberleşme Katmanı ve Veri Protokolü

Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemlerde, gömülü cihazlar ile üst seviye yazılım bileşenleri arasındaki haberleşmenin düşük gecikmeli, bant genişliği açısından verimli ve bağlantı sürekliliği bakımından kararlı olması, sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle işlemci gücü ve bellek kapasitesi sınırlı olan gömülü kontrol birimlerinde, kullanılan haberleşme protokolünün oluşturduğu işlem yükü ve ağ trafiği kritik bir tasarım parametresi hâline gelmektedir.

Bu nedenle geliştirilen sistemde, her veri iletimi için ayrı bir bağlantı kurulmasını gerektiren HTTP tabanlı yaklaşımlar yerine; sürekli bağlantı modeli sunan, küçük boyutlu veri paketleri ile çalışabilen ve IoT uygulamaları için optimize edilmiş MQTT protokolü tercih edilmiştir. Bu tercih, sistemin sürekli ve periyodik veri üreten yapısına daha uygun bir haberleşme altyapısı sunmaktadır.

Sistemin haberleşme mimarisi, yayınla/abone ol (publish/subscribe) prensibine dayalı olarak tasarlanmıştır. Bu yapıda ESP32 tabanlı gömülü kontrol birimi, sensörlerden elde edilen ölçüm verilerini belirlenen periyotlarla MQTT broker üzerinden ilgili konu başlıklarına yayınlamakta; üst katmanda çalışan yazılım bileşenleri ise bu verileri ihtiyaçlarına göre dinlemektedir. Benzer biçimde, kullanıcı tarafından oluşturulan kontrol komutları da ayrı konu başlıkları üzerinden gömülü sisteme iletilmektedir. Böylece veri iletimi ile kontrol komutları işlevsel olarak ayrıştırılmakta; sistem bileşenleri arasında doğrudan ve katı bağımlılıklar oluşturmayan esnek bir haberleşme altyapısı elde edilmektedir.

4.4.1. MQTT Protokolü ve Yayınla/Abone Ol Mimarisi

Geliştirilen IoT tabanlı hidroponik sistemin haberleşme omurgasında, istemci–sunucu tabanlı geleneksel HTTP yaklaşımı yerine MQTT protokolü kullanılmıştır. Bu tercih; sistemin saniyeler mertebesinde veri üreten yapısı, kablosuz ağ koşullarında karşılaşılabilecek bağlantı dalgalanmaları ve gömülü kontrol biriminin sınırlı kaynakları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

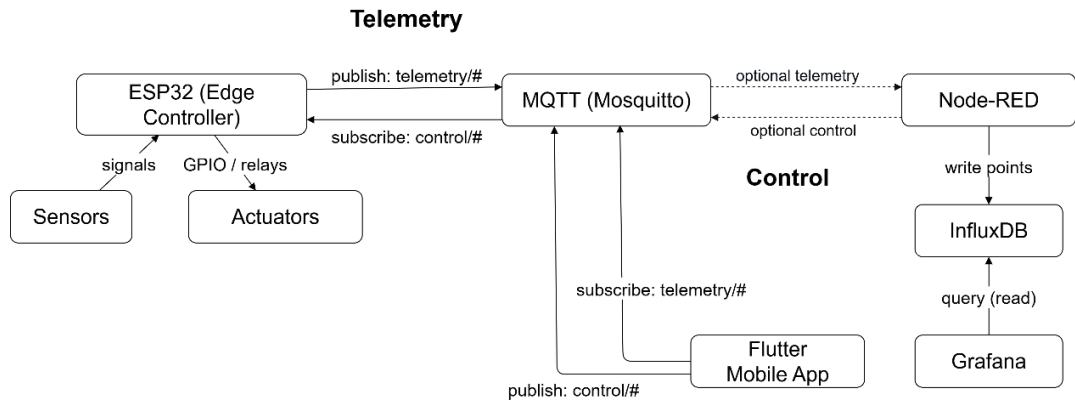
Hidroponik sistemde ESP32 tabanlı gömülü kontrol birimi, pH, TDS, sıcaklık ve akış gibi sensör verilerini düzenli aralıklarla üretmektedir. Bu tür periyodik veri iletimi gerektiren uygulamalarda, her veri gönderimi için ayrı bir istek–yanıt döngüsü

oluşturan HTTP tabanlı haberleşme yaklaşımı; ağ trafiğini ve işlemci yükünü artırmaktadır. MQTT protokolü ise düşük başlık (header) yükü ve sürekli bağlantı modeli sayesinde, aynı veri trafiğini daha düşük bant genişliği kullanımı ile iletebilmektedir.

MQTT'nin yayımla/abone ol (publish/subscribe) mimarisi, veri üretimi ile veri tüketimini birbirinden ayırarak sistem bileşenlerinin bağımsız çalışmasına olanak tanımaktadır. Bu mimaride ESP32, sensör verilerini belirlenen konu başlıkları üzerinden MQTT broker'a yayınlamakta; Node-RED tabanlı entegrasyon katmanı ve mobil uygulamalar bu verileri ihtiyaç duydukları ölçüde abone olarak almaktadır. Benzer şekilde, kullanıcı tarafından oluşturulan kontrol komutları ayrı konu başlıkları üzerinden yayınlanmakta ve ESP32 bu komutlara abone olarak FSM tabanlı kontrol mantığı çerçevesinde değerlendirmektedir.

Bu yapı sayesinde üst seviye yazılım bileşenlerinin (mobil uygulama, dashboard veya sunucu servisleri) geçici olarak çevrimdışı olması durumunda dahi, gömülü kontrol birimi yerel kontrol döngüsünü kesintisiz biçimde sürdürmekte ve sensör verilerini broker'a yayınlamaya devam etmektedir. MQTT protokolünün keep-alive ve yeniden bağlanma (reconnection) mekanizmaları, kablosuz ağlarda yaşanabilecek geçici kopmaların sistemin genel işleyişini etkilemesini önlemektedir.

Sistemde kullanılan MQTT broker üzerinden gerçekleşen veri akışları ile bu verilerin Node-RED entegrasyon katmanı aracılığıyla InfluxDB ve Grafana gibi arka uç bileşenlerine yönlendirilmesini gösteren genel haberleşme mimarisi, Şekil 4.14'te sunulmuştur.



Şekil 4.14: MQTT tabanlı yayımla/abone ol haberleşme mimarisi.

4.4.2. Topic (Konu Başlığı) Hiyerarşisi ve API Sözleşmesi

Sistem bileşenleri arasında gerçekleşen veri trafiğinin düzenli, ölçeklenebilir ve çatışmalardan arındırılmış bir yapıda yürütülebilmesi amacıyla, hiyerarşik bir MQTT konu başlığı (topic) yapısı tasarlanmıştır. Bu yapı, yalnızca mesaj yönlendirme mekanizması olarak değil; aynı zamanda sistem bileşenleri arasında tanımlı, öngörülebilir ve tutarlı bir iletişim arayüzü (API sözleşmesi) olarak ele alınmıştır.

Tasarlanan konu başlığı hiyerarşisi, sistemdeki veri akışlarını işlevsel olarak ayrıştırarak telemetri verileri ile kontrol komutlarının birbirinden bağımsız biçimde yönetilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda MQTT haberleşme trafiği, gönderilen veriler (telemetri) ve alınan veriler (kontrol komutları) olmak üzere iki ana dal altında organize edilmiştir. Böylece sensör ölçümlerinin yayınlanması ile kullanıcı veya üst seviye yazılım bileşenlerinden gelen komutlar arasında açık bir mantıksal ayrım oluşturulmuştur.

Bu yaklaşım, sistemin ilerleyen aşamalarda yeni sensörlerin, aktüatörlerin veya yazılım bileşenlerinin eklenmesine olanak tanırken, mevcut haberleşme altyapısında köklü değişiklikler yapılmadan genişletilebilir bir mimari sunmaktadır. Ayrıca konu başlıklarının açık ve hiyerarşik biçimde tanımlanması; hata ayıklama süreçlerini kolaylaştırmakta, farklı istemcilerin (Node-RED, mobil uygulama, veri tabanı servisleri) aynı MQTT altyapısı üzerinden eş zamanlı ve tutarlı biçimde çalışabilmesini mümkün kılmaktadır.

Sistemde kullanılan MQTT konu başlıkları, mesaj yönleri ve işlevsel görevleri Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

Tablo 4.5: MQTT konu başlıkları ve işlevsel görevleri.

Topic	Yön	Veri Türü	Temel İşlev
nft/status/sensors	ESP32 → Broker	JSON	Tüm sensör ölçümlerini içeren ana telemetri paketi
nft/status/system	ESP32 → Broker	String	Sistem modu ve hata/durum bilgileri
nft/cmd/mode	Broker → ESP32	String	Çalışma modu seçimi (AUTO / MANUAL / CAL)
nft/cmd/pump_main	Broker → ESP32	Bool (0/1)	Sirkülasyon pompası Aç/Kapa kontrolü
nft/cmd/set_ph	Broker → ESP32	Float	Hedef pH değerinin güncellenmesi
nft/cmd/set_tds	Broker → ESP32	Int	Hedef TDS (ppm) değerinin güncellenmesi

4.4.3. Veri Serileştirme (JSON) ve Payload Yapısı

ESP32 tabanlı gömülü sistemden elde edilen sensör ölçümlerinin ve sistem durum bilgilerinin farklı yazılım bileşenleri tarafından tutarlı ve kayıpsız biçimde işlenebilmesi amacıyla, veri serileştirme formatı olarak JSON kullanılmıştır. JSON; okunabilirliği yüksek, düşük protokol ek yüküne sahip ve platformdan bağımsız bir yapı sunması nedeniyle IoT tabanlı sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Sistem mimarisinde sensör ölçümleri (pH, TDS, sıcaklık, nem vb.) ile sistemin aktif çalışma modu ve durum bayrakları tek bir JSON payload altında birleştirilerek yayınlanmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım, farklı veri türlerinin (float, integer, boolean) aynı mesaj içerisinde birlikte taşınmasına olanak sağlarken, veri bütünlüğünün korunmasını da sağlamaktadır.

Yayınlanan JSON veri yapısı, anlamsal ayrımı kolaylaştırmak amacıyla iki ana alt bloktan oluşmaktadır: sensors bloğu ölçüm verilerini, system bloğu ise sistemin aktif çalışma modu ve durum bilgilerini temsil etmektedir. Bu yapı, alıcı tarafta yalnızca ihtiyaç duyulan alanların ayrıştırılarak işlenmesine imkân tanımaktadır.

Sistemden periyodik olarak yayınlanan ve sensör ölçümleri ile sistem durum bilgilerini tek bir JSON payload altında birleştiren örnek veri yapısı Şekil 4.15'te sunulmaktadır.

```
{
  "timestamp": 1715092350,
  "sensors": {
    "ph": 5.8,
    "tds": 840,
    "water_temp": 24.5,
    "air_temp": 26.2,
    "humidity": 60,
    "distance": 15
  },
  "system": {
    "mode": "AUTO",
    "relay_states": [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "wifi_rssi": -58
  }
}
```

Şekil 4.15: MQTT üzerinden yayınlanan örnek JSON telemetri paketi.

Bu yapı sayesinde tüm ölçüm ve durum verileri ortak bir zaman damgası ile ilişkilendirilerek sunucu tarafına iletilmektedir. Böylece zaman serisi tabanlı veri tabanlarında farklı parametrelerin aynı zaman ekseninde senkronize biçimde saklanması sağlanmakta; uzun dönemli analizlerde zamansal kaymaların önüne geçilmektedir. Aynı payload yapısı, mobil uygulama katmanında sistemin anlık durumunun düşük gecikmeli ve tutarlı biçimde kullanıcıya sunulmasında da kullanılmaktadır.

4.4.4. Bağlantı Güvenilirliği ve QoS Politikaları

Geliştirilen hidroponik sistemin uzaktan izleme ve kontrol işlevlerini güvenilir biçimde sürdürebilmesi amacıyla, MQTT protokolünün sunduğu Hizmet Kalitesi (Quality of Service – QoS) mekanizmaları veri türlerinin kritikliği dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

Yüksek frekansta yayınlanan sensör telemetri verileri, tekil bir mesaj kaybının sistem davranışını doğrudan etkilememesi nedeniyle QoS 0 (en fazla bir kez) seviyesi ile iletilmektedir. Bu tercih, protokol ek yükünü en aza indirerek ağ trafiğini azaltmakta ve sistemin gerçek zamanlı tepki yeteneğini korumaktadır.

Buna karşılık, sistem davranışını doğrudan etkileyen kontrol komutları ve yapılandırma değişiklikleri QoS 1 (en az bir kez) seviyesi ile iletilmektedir. Bu

seviyede, mesajın alıcıya ulaştığı broker tarafından onaylanmakta; böylece kritik komutların ağ kopmaları nedeniyle kaybolma riski azaltılmaktadır.

Sistemin çevrimiçi durumunun izlenebilmesi amacıyla MQTT'nin Last Will and Testament (LWT) mekanizması da yapılandırılmıştır. ESP32'nin beklenmeyen bir nedenle broker bağlantısını kaybetmesi durumunda, önceden tanımlı bir "cihaz çevrimdışı" durumu otomatik olarak yayınlanmakta ve üst katman yazılımlar kullanıcıyı anlık olarak bilgilendirmektedir.

Bu QoS ve bağlantı izleme stratejisi sayesinde sistem; izleme verileri için düşük gecikmeli ve verimli bir haberleşme yapısı sunarken, kontrol ve emniyet açısından kritik mesajlar için yeterli düzeyde iletim güvencesi sağlamaktadır. Böylece performans ile haberleşme güvenilirliği arasında dengeli bir mimari yaklaşım benimsenmiştir.

4.5. Sunucu Tarafı Uygulama ve Hizmetlerin Kurulumu

Önceki bölümde tanımlanan MQTT tabanlı haberleşme altyapısının etkin biçimde kullanılabilmesi için, sistemin üst katmanında sensör verilerinin işlenmesi, kalıcı olarak depolanması ve kullanıcıya anlamlı biçimde sunulması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen sunucu tarafı mimari; veri akışlarının yönetildiği, kontrol komutlarının üretildiği ve uzun dönemli analizlerin gerçekleştirildiği merkezi bir katman olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada sunucu katmanı; MQTT Broker, Node-RED ve InfluxDB servislerinin tek bir ana bilgisayar (host machine) üzerinde bütünleşik olarak çalıştığı bir yapı üzerine inşa edilmiştir. Bu yaklaşım, sistem bileşenleri arasındaki veri iletim gecikmesini azaltmakta, kurulum ve bakım süreçlerini sadeleştirmekte ve geliştirme aşamasında esnek bir test ve doğrulama ortamı sunmaktadır.

Sunucu ortamı olarak Windows işletim sistemine sahip bir bilgisayar tercih edilmiş; MQTT tabanlı haberleşme, akış tabanlı veri işleme ve zaman serisi veri depolama servisleri bu platform üzerinde yapılandırılmıştır. Kurulan bu servisler sayesinde, ESP32 tabanlı gömülü sistemden yayınlanan telemetri verileri gerçek zamanlı olarak işlenebilmekte, saklanabilmekte ve kullanıcı arayüzleri üzerinden izlenebilir hâle getirilmektedir.

4.5.1. MQTT Broker (Mosquitto) Kurulumu ve Yapılandırması

Sistemin gömülü kontrol katmanı ile sunucu taraflı yazılım bileşenleri arasında güvenilir ve düşük gecikmeli bir haberleşme altyapısı oluşturmak amacıyla, MQTT broker yazılımı olarak açık kaynaklı Eclipse Mosquitto tercih edilmiştir. Mosquitto; düşük sistem kaynak tüketimi, kararlı çalışma karakteristiği ve MQTT standardı ile tam uyumluluğu nedeniyle IoT tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir broker çözümüdür.

Kurulan haberleşme altyapısının, ESP32 tabanlı gömülü sistemler ve üst katmanda çalışan yazılımlar (Node-RED, mobil uygulama) tarafından kesintisiz biçimde kullanılabilmesi için broker servisi sunucu üzerinde kalıcı bir servis (daemon) olarak yapılandırılmıştır. Böylece sunucu sisteminin yeniden başlatılması durumunda MQTT altyapısının otomatik olarak devreye girmesi sağlanmıştır.

Broker yapılandırması sırasında mosquitto.conf dosyası üzerinde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. MQTT istemcilerinin standart bağlantı noktası üzerinden haberleşebilmesi amacıyla 1883 numaralı port aktif edilmiştir. Test ve geliştirme aşamasında, yerel ağ (LAN) içerisindeki istemcilerin ek kimlik doğrulama gereksinimi olmaksızın brokera bağlanabilmesi için allow_anonymous true parametresi etkinleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu yapılandırmanın yalnızca geliştirme ortamları için uygun olduğu; üretim senaryolarında kullanıcı adı/parola tabanlı erişim denetimi ve TLS şifreleme gibi ek güvenlik mekanizmalarının devreye alınması gerektiği özellikle not edilmiştir.

Veri sürekliliğini artırmak amacıyla broker üzerinde kalıcılık (persistence) özelliği etkinleştirilmiştir. Bu sayede istemci bağlantılarının geçici olarak kopması durumunda, MQTT mesajlarının kaybolmasının önüne geçilmiş ve istemcinin yeniden bağlanmasının ardından veri akışının devam etmesi sağlanmıştır.

Geliştirme ortamına yönelik gerçekleştirilen bu yapılandırmaya ait temel bağlantı ve kalıcılık parametrelerini içeren konfigürasyon kesiti Şekil 4.16'da sunulmuştur.

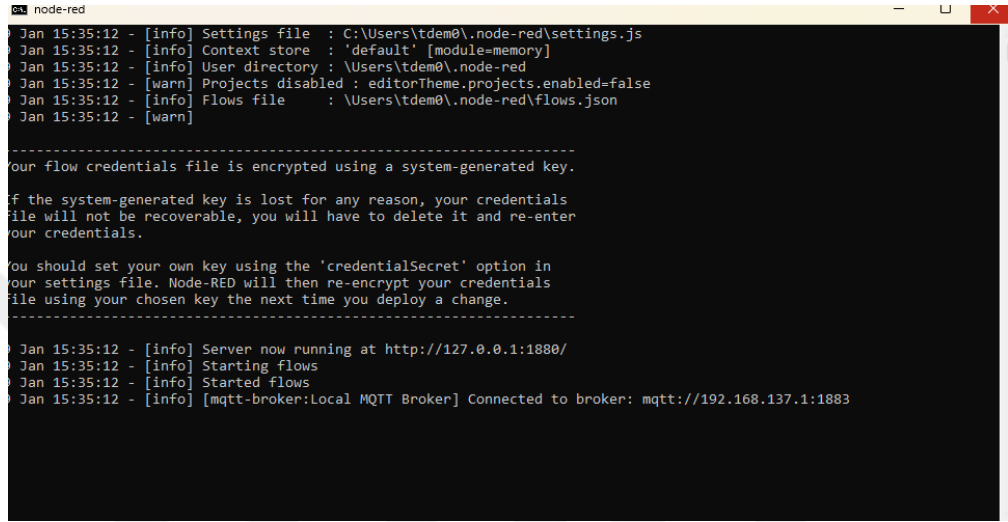
```
# Standart MQTT Portu Dinleme
listener 1883

# Anonim Bağlantı İzni (Lokal ağ testleri için aktif)
allow_anonymous true

# Veri Kalıcılığı ve Loglama
persistence true
persistence_location /mosquitto/data/
```

Şekil 4.16: Mosquitto yapılandırma dosyası temel parametreleri.

Yapılandırmanın doğrulanması amacıyla, Node-RED servisinin başlatılması sırasında oluşturulan sistem logları incelenmiştir. Sunucu terminalinde görüntülenen “Connected to broker” ifadesi ile Node-RED uygulamasının 192.168.137.1:1883 adresinde çalışan MQTT broker’a başarıyla bağlandığı teyit edilmiştir. Bu doğrulama çıktısı Şekil 4.17’de sunulmuştur.



```
node-red
Jan 15:35:12 - [info] Settings file : C:\Users\tdem0\.node-red\settings.js
Jan 15:35:12 - [info] Context store : 'default' [module-memory]
Jan 15:35:12 - [info] User directory : \Users\tdem0\.node-red
Jan 15:35:12 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
Jan 15:35:12 - [info] Flows file : \Users\tdem0\.node-red\flows.json
Jan 15:35:12 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----

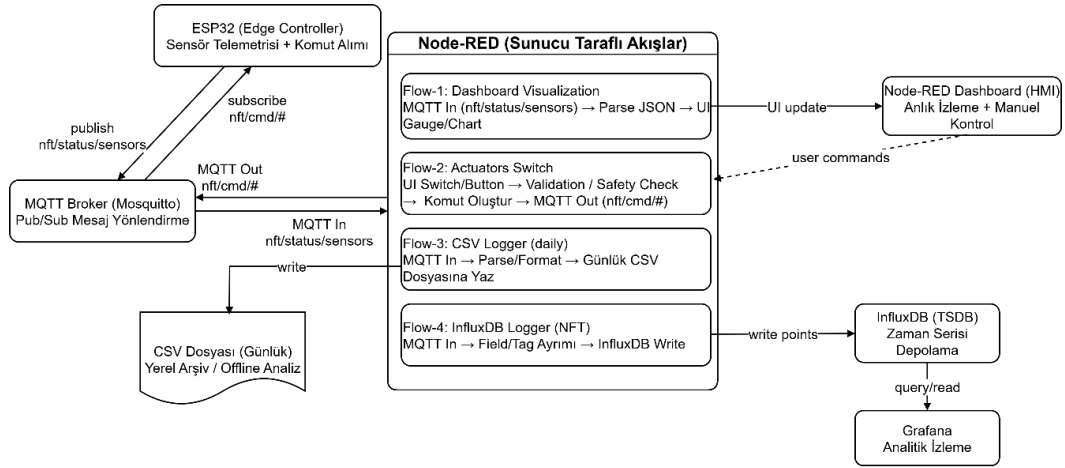
Jan 15:35:12 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
Jan 15:35:12 - [info] Starting flows
Jan 15:35:12 - [info] Started flows
Jan 15:35:12 - [info] [mqtt-broker:Local MQTT Broker] Connected to broker: mqtt://192.168.137.1:1883
```

Şekil 4.17: Node-RED ve MQTT broker bağlantı doğrulaması.

4.5.2. Node-RED Akış Mimarisi ve Sunucu Taraflı Veri İşleme

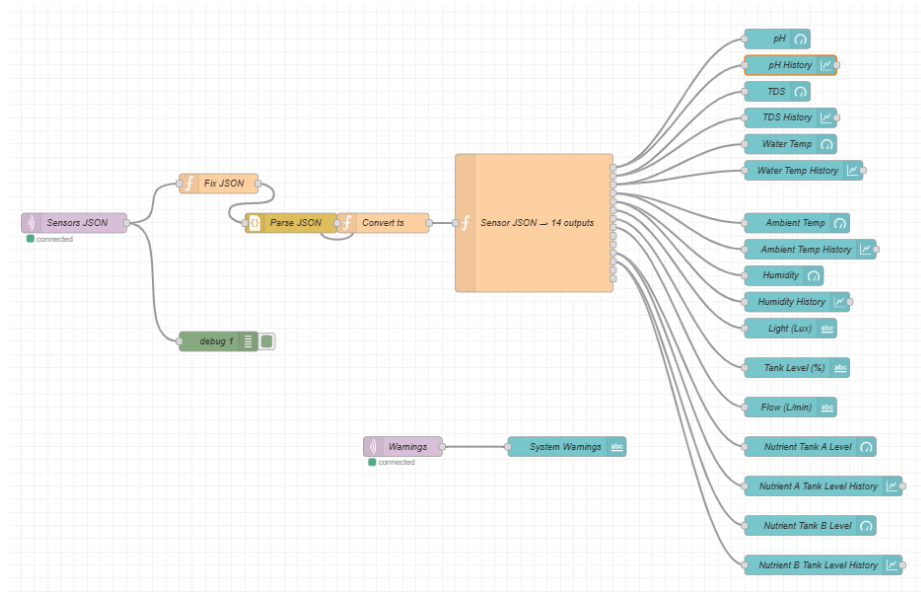
Sunucu tarafındaki iş mantığı, olay tabanlı (event-driven) çalışma modeli ve görsel akış temelli programlama yaklaşımı doğrultusunda Node-RED platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Node-RED; MQTT Broker üzerinden iletilen sensör telemetrilerini, kullanıcı kontrol komutlarını ve sistemin aktif çalışma moduna ilişkin durum bilgilerini eş zamanlı olarak işleyebilen, modüler ve genişletilebilir bir sunucu taraflı yazılım altyapısı sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Node-RED üzerinde, sistemin farklı işlevsel gereksinimlerini birbirinden ayırıştıran ve paralel olarak çalışan dört temel akış (flow) tasarlanmıştır. Bu akışlar; gerçek zamanlı izleme, manuel aktüatör kontrolü, yerel dosya tabanlı veri kaydı ve zaman serisi veritabanı entegrasyonu görevlerini üstlenmektedir. Sunucu taraflı genel akış mimarisi Şekil 4.18’de sunulmuştur.



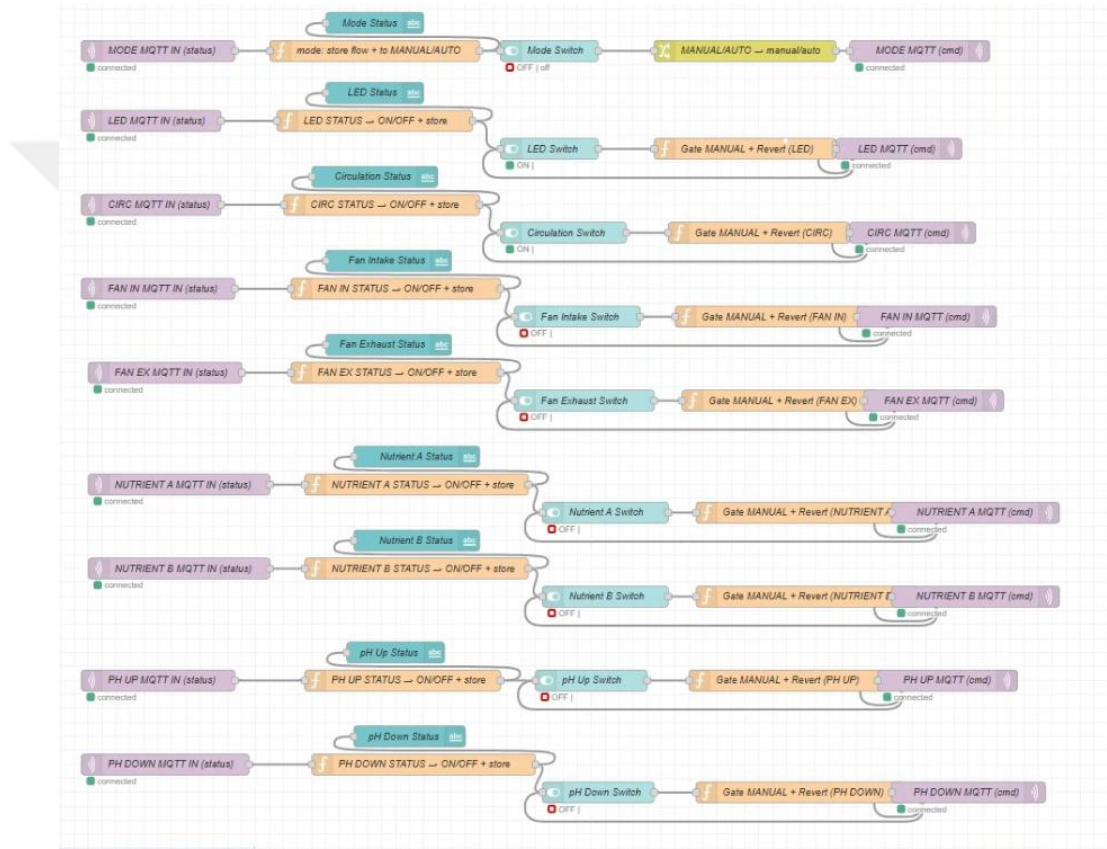
Şekil 4.18: Node-RED sunucu tarafı genel akış mimarisi.

Gerçek zamanlı izleme işlevi, Dashboard Visualization akışı üzerinden yürütülmektedir (Şekil 4.19). Bu akışta, MQTT Broker üzerindeki nft/status/sensors konu başlığına abone olunarak ESP32 tarafından yayınlanan JSON formatındaki sensör telemetrisi alınmaktadır. Gelen veriler, JSON ayrıştırma düğümleri aracılığıyla ilgili parametrelere bölünmekte ve Node-RED Dashboard bileşenleri (gösterge, grafik vb.) kullanılarak kullanıcı arayüzüne aktarılmaktadır. Bu yapı sayesinde pH, TDS, sıcaklık ve nem gibi kritik parametreler anlık olarak izlenebilmektedir.



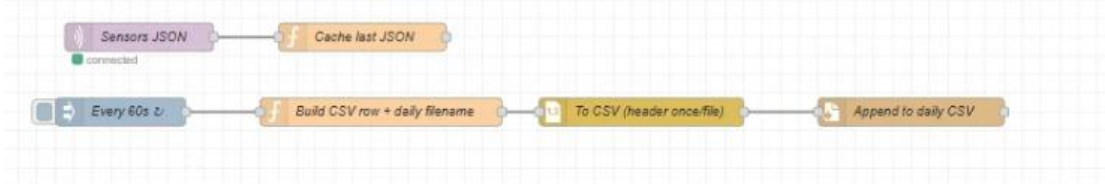
Şekil 4.19: Dashboard izleme akışı.

Manuel kontrol işlevleri, Actuators Switch akışı üzerinden gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.20). Bu akışta kullanıcı tarafından Node-RED Dashboard arayüzü üzerinden tetiklenen anahtar (switch) bileşenleri, ilgili kontrol komutlarına dönüştürülerek MQTT Broker aracılığıyla ESP32'ye iletilmektedir. Gönderilen komutlar nft/cmd/# konu başlıkları altında yayınlanmakta olup, bu yapı sayesinde sistem manuel modda çalışırken aktüatörlerin doğrudan ve düşük gecikmeli biçimde kontrol edilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 4.20: Aktüatör kontrol (switch) akışı.

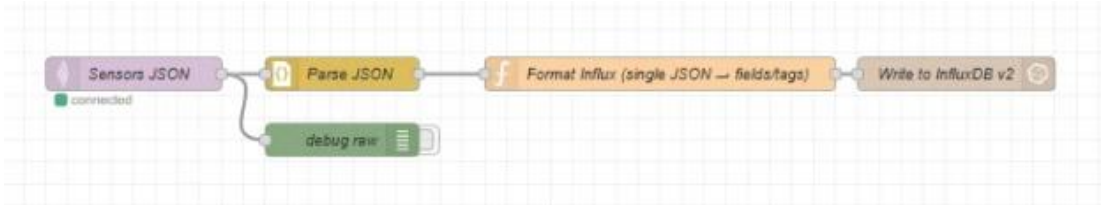
Sistemin yerel veri arşivleme gereksinimini karşılamak amacıyla CSV Logger (Daily) akışı tasarlanmıştır (Şekil 4.21). Bu akış, MQTT üzerinden alınan sensör telemetrilerini günlük olarak oluşturulan CSV dosyalarına kaydetmektedir. Dosya isimlendirme yapısı tarih bazlı olarak kurgulanmış olup, bu sayede uzun dönemli veri arşivleme ve çevrimdışı analiz işlemleri desteklenmektedir.



Şekil 4.21: CSV günlük veri kayıt akışı.

Uzun vadeli veri analizi ve görselleştirme amacıyla InfluxDB Logger (NFT) akışı kullanılmıştır (Şekil 4.22). Bu akışta MQTT üzerinden gelen sensör verileri ayrıştırılarak zaman serisi veritabanı olan InfluxDB’ye yazılmaktadır. Veriler, uygun etiket (tag) ve alan (field) yapısı ile saklanmakta; böylece yüksek frekanslı ölçümler performans kaybı oluşturmada depolanabilmektedir. Bu yapı, Grafana üzerinden gerçekleştirilen tarihsel analizlerin temelini oluşturmaktadır.

Bu dört akışın birbirinden bağımsız ancak eş zamanlı olarak çalışabilmesi, sistemin bloklamasız ve ölçeklenebilir bir sunucu mimarisi üzerinde işletilmesini sağlamaktadır. İzleme, kontrol ve veri kayıt işlemlerinin ayrı akışlar altında yapılandırılması, sistem güvenilirliğini artırmakta ve ileride yapılabilecek yazılımsal genişletmeler için esnek bir temel sunmaktadır.



Şekil 4.22: InfluxDB zaman serisi kayıt akışı.

4.5.3. Veritabanı Entegrasyonu ve Zaman Serisi Kaydı (InfluxDB)

Hidroponik sistem tarafından üretilen yüksek frekanslı sensör verilerinin (sıcaklık, pH, TDS ve nem) uzun süreli olarak saklanabilmesi ve geçmişe dönük analizlere olanak tanınması amacıyla, ilişkisel veritabanları yerine zaman serisi verileri için optimize edilmiş bir veritabanı çözümü tercih edilmiştir. Bu kapsamda, zaman damgası temelli veri modeli ve yüksek yazma performansı sunması nedeniyle InfluxDB kullanılmıştır.

Veri kayıt süreci, Node-RED üzerinde tanımlanan ve sunucu taraflı veri işleme katmanının bir parçası olarak çalışan InfluxDB Logger akışı aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. MQTT Broker üzerinden alınan JSON formatındaki telemetri verileri, bu akış içerisinde ayrıştırılarak InfluxDB veritabanına yazılmaktadır.

Veritabanı yapısı, sistemin ölçeklenebilirliği ve sorgu performansı dikkate alınarak zaman serisi veri modeline uygun biçimde yapılandırılmıştır. Sensör ölçümleri tek bir ölçüm kümesi (measurement) altında toplanmış; verinin kaynağını ve bağlamını tanımlamak amacıyla cihaz ve sistem bilgileri etiket (tag) olarak tanımlanmıştır. Ölçülen fiziksel büyüklükler ise alan (field) olarak saklanmıştır. Bu yaklaşım, zaman serisi veritabanları için önerilen veri modelleme prensipleri ile uyumlu olup, zamana bağlı analizlerin ve bağlam bazlı sorguların etkin biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

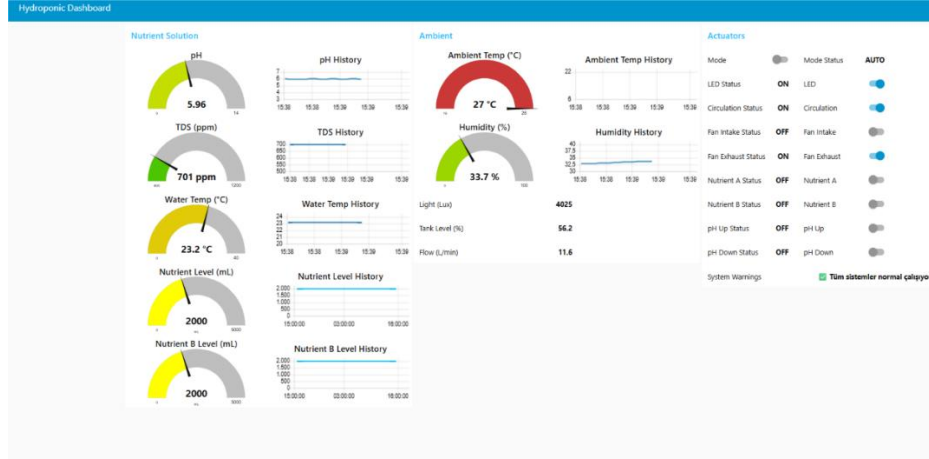
Oluşturulan bu zaman serisi veri modeli sayesinde, sistemden sürekli olarak üretilen ölçüm verileri verimli biçimde depolanabilmekte; uzun dönemli eğilim analizleri ve geçmişe dönük karşılaştırmalar makul sorgu süreleri içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yapı, hidroponik sistemin çevresel ve besin çözeltisi parametrelerinin zaman içerisindeki değişiminin nicel olarak incelenmesine ve sistem performansının değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır.

4.5.4. Veri Görselleştirme ve Kontrol Arayüzleri

Sistemin insan-makine etkileşimi (Human-Machine Interface, HMI), kullanım amacı ve veri işleme gereksinimleri doğrultusunda iki ayrı katmanda ele alınmıştır: operasyonel yönetim arayüzü ve analitik izleme arayüzü. Bu ayrım, gerçek zamanlı kontrol ihtiyaçları ile uzun dönemli performans analizlerinin birbirinden ayrıştırılarak daha düzenli ve sürdürülebilir bir yapı içerisinde yürütülmesini sağlamaktadır.

Operasyonel yönetim katmanı, Node-RED Dashboard altyapısı kullanılarak geliştirilmiştir. Bu arayüz, sistemin anlık durumunun izlenmesi ve kullanıcı tarafından doğrudan kontrol edilebilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Node-RED kütüphanesinde yer alan ui_gauge, ui_chart ve ui_switch bileşenleri kullanılarak oluşturulan panel üzerinden pH, TDS, sıcaklık ve nem gibi kritik parametreler gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte; sistem çalışma modu otomatik ve manuel arasında değiştirilebilmekte

ve aktüatörler kullanıcı komutlarına bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. Node-RED tabanlı operasyonel kontrol paneli Şekil 4.23'te sunulmuştur.



Şekil 4.23: Node-RED tabanlı izleme ve kontrol paneli.

Analitik izleme katmanı ise, sistem performansının uzun vadeli değerlendirilmesi ve zamana bağlı eğilimlerin incelenmesi amacıyla Grafana platformu üzerinde oluşturulmuştur. Grafana, InfluxDB zaman serisi veritabanına doğrudan bağlanarak InfluxQL sorguları aracılığıyla etkileşimli grafikler üretmektedir. Bu arayüzde pH değerlerindeki zamansal değişimler, ortam ve besin çözeltisi sıcaklıkları arasındaki ilişkiler ve kontrol algoritmalarında uygulanan histerezis mekanizmasının aktüatör davranışına etkileri analiz edilebilmektedir. Oluşturulan Grafana tabanlı analitik izleme ekranı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Grafana tabanlı analitik izleme ekranı.

4.6. Mobil Uygulama Mimarisi (Flutter & Dart)

Geliştirilen hidroponik sistemin uzaktan izlenmesi ve kullanıcı tarafından yönetilebilmesi amacıyla, Flutter yazılım geliştirme kiti kullanılarak Android işletim sistemi için bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Uygulama, Dart programlama dili ile gerçekleştirilmiş olup, arayüz tasarımı Android ekosisteminde yaygın olarak benimsenen Material Design prensipleri doğrultusunda yapılandırılmıştır.

Mobil uygulama, sistem mimarisi içerisinde kullanıcı etkileşim katmanı olarak konumlandırılmıştır. Sensör verilerinin işlenmesi, kontrol algoritmalarının yürütülmesi ve veri depolama işlemleri sunucu katmanında gerçekleştirilirken; mobil uygulama bu verilerin kullanıcıya görsel ve etkileşimli biçimde sunulmasını ve kullanıcı komutlarının sisteme iletilmesini sağlamaktadır. Bu mimari tercih, istemci tarafında hesaplama yükünü minimize ederken, mobil cihaz kaynaklarının verimli kullanımını mümkün kılmaktadır.

4.6.1. Uygulama Mimarisi ve Durum Yönetimi

Mobil uygulamanın geliştirilmesinde, kodun sürdürülebilirliğini artırmak ve bileşenler arası bağımlılıkları azaltmak amacıyla MVVM (Model–View–ViewModel) tasarım desenine dayalı katmanlı bir mimari benimsenmiştir. Bu yapı sayesinde kullanıcı arayüzü, veri işleme ve haberleşme katmanlarından ayrıştırılmış; arayüz bileşenlerinin doğrudan ağ veya protokol detaylarına bağımlı olması engellenmiştir.

Uygulama genelinde sensör verilerinin ve sistem bağlantı durumunun farklı ekranlar arasında tutarlı biçimde paylaşılabilmesi için merkezi durum yönetimi yaklaşımı uygulanmıştır. Bu kapsamda, Flutter ekosisteminde düşük karmaşıklık ve yüksek okunabilirlik sunan Provider paketi tercih edilmiştir. Provider tabanlı yapı sayesinde, MQTT üzerinden alınan veriler tek bir merkezde güncellenmekte ve bu güncellemeler yalnızca ilgili arayüz bileşenlerine yansıtılmaktadır.

Mobil uygulamaya ait dosya yapısı, mimari katmanlara göre düzenlenmiş olup, temel bileşenler ve sorumlulukları Tablo 4.6’da özetlenmiştir.

Tablo 4.6: Mobil uygulama dosya yapısı ve işlevsel görevleri.

Dosya	Katman	Temel Görev
lib/main.dart	ViewModel	Uygulama başlangıcı ve Provider yapılandırması
lib/providers/sensor_provider.dart	ViewModel	MQTT verilerinin yönetimi ve durum güncellemesi
lib/services/mqtt_service.dart	Service	MQTT bağlantısı, abonelikler ve komut iletimi
lib/screens/dashboard_screen.dart	View (UI)	Sensör verilerinin görsel sunumu
lib/screens/controls_screen.dart	View (UI)	Çalışma modu ve aktüatör kontrolü
lib/screens/settings_screen.dart	View (UI)	MQTT bağlantı ayarları

4.6.2. Haberleşme Mantığı ve Veri Akışı

Mobil uygulamanın sunucu katmanı ile haberleşmesi, MQTT protokolü üzerinden çift yönlü ve olay tabanlı bir veri akışı modeli ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama başlatıldığında, MQTT servis bileşeni devreye girerek yapılandırma ekranında tanımlanan broker adresi üzerinden bağlantıyı kurmaktadır. Bu süreç, kullanıcı arayüzünü bloke etmeyecek biçimde arka planda yürütülmektedir.

Sensör verilerinin mobil uygulamaya aktarılması, MQTT abonelik mekanizması üzerinden sağlanmaktadır. Uygulama, nft/status/sensors konu başlığına abone olarak ESP32 tarafından yayınlanan JSON formatındaki telemetri paketlerini almaktadır. Alınan veriler, ViewModel katmanında ayrıştırılarak merkezi durum yönetimi yapısına aktarılmakta ve ilgili arayüz bileşenleri otomatik olarak güncellenmektedir. Bu yaklaşım, gereksiz ekran yenilemelerini engelleyerek istemci tarafı kaynak kullanımını sınırlandırmaktadır.

Kullanıcı tarafından gerçekleştirilen kontrol işlemleri ise MQTT yayınlama mekanizması aracılığıyla sisteme iletilmektedir. Kontrol ekranı üzerinden tetiklenen her kullanıcı eylemi, ilgili MQTT konu başlığı altında uygun payload değeri ile broker'a yayınlanmakta ve ESP32 kontrol birimi tarafından değerlendirilerek fiziksel eyleme dönüştürülmektedir. Bu yapı, sistemin uzaktan ve gerçek zamanlı biçimde yönetilmesini mümkün kılmaktadır.

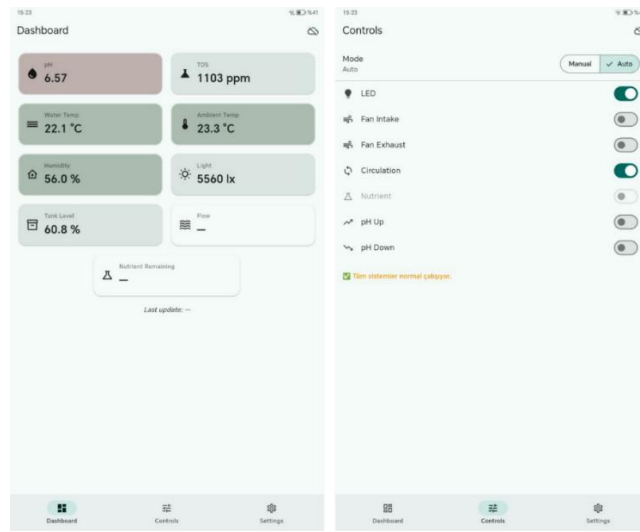
4.6.3. Kullanıcı Arayüzü (UI) Tasarımı

Mobil uygulamanın kullanıcı arayüzü, okunabilirlik, hızlı algılanabilirlik ve düşük etkileşim yükü ilkeleri doğrultusunda tasarlanmıştır. Arayüzde kart tabanlı yerleşim yapısı, anahtar (switch) bileşenleri ve durum odaklı görsel geri bildirimler kullanılmıştır.

Ana izleme ekranı (Dashboard), sistemin genel durumunun tek bakışta değerlendirilebilmesine olanak sağlayacak şekilde kurgulanmıştır. pH, TDS, sıcaklık, nem, ışık şiddeti, tank seviyesi ve akış bilgileri ayrı görsel kartlar üzerinde sunulmuş; kritik parametreler için renk kodlaması kullanılarak anormal durumların hızlı biçimde fark edilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, mobil ortamda detaylı grafik analizlerinden ziyade anlık durum farkındalığını ön plana çıkarmaktadır.

Kontrol ekranı ise sistemin çalışma modlarının (Otomatik / Manuel) yönetildiği ve aktüatörlerin doğrudan kontrol edilebildiği bir yapı sunmaktadır. Manuel moda geçildiğinde kullanıcı, ilgili aktüatörler üzerinde doğrudan yetki sahibi olurken; otomatik modda bu kontroller yazılımsal olarak devre dışı bırakılmaktadır. Bu ayırım, kullanıcı müdahaleleri ile otomatik kontrol algoritmaları arasında çatışma oluşmasını engelleyen güvenli bir etkileşim modeli sağlamaktadır.

Geliştirilen mobil uygulamaya ait ana izleme ve kontrol ekranları, Şekil 4.25'te sunulmuştur.



(a)

(b)

Şekil 4.25: Mobil uygulama arayüzleri: (a) Dashboard, (b) Kontrol.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

5.1. Deneysel Kurulum ve Sistem Başlatma Süreci

Bu bölümde, geliştirilen IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistemin gerçek çalışma koşulları altındaki davranışı ve performansı değerlendirilmiştir. Deneysel incelemeler; donanım başlatma süreci, sensör ölçüm güvenilirliği, FSM tabanlı kontrol algoritmasının kararlılığı ve uzaktan izleme-veri kaydı altyapısının operasyonel performansı olmak üzere dört ana ekseninde yürütülmüştür.

Sistem çalıştırıldığında, ESP32 tabanlı gömülü kontrol birimi tanımlı bir başlatma (initialization) sıralamasını yürütmektedir. Bu süreçte donanım bileşenleri, sensörler ve haberleşme modülleri belirlenmiş öncelik düzenine göre devreye alınmakta; pano üzerine entegre edilen I2C tabanlı LCD ekran, başlatma sürecine ilişkin kullanıcıya anlık görsel geri bildirim sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen açılış senaryosu aşağıdaki temel adımlardan oluşmaktadır:

- 1. Donanım Doğrulama:** G/Ç portları, I2C veri yolu ve bağlı sensörlerin erişilebilirliği denetlenir.
- 2. Zaman Senkronizasyonu:** RTC modülü okunarak sistem zamanı güncellenir.
- 3. Ağ Bağlantısı:** Wi-Fi modülü başlatılır ve yapılandırılmış ağa bağlantı sağlanır.
- 4. MQTT Bağlantı Kurulumu ve Doğrulaması:** Broker bağlantısı kurulur ve sistemin çevrimiçi durumu yayınlanır.

Başlatma sürecinin tamamlanmasının ardından LCD arayüz, yerel izleme amacıyla tasarlanmış üç sayfalı döngüsel gösterim moduna geçmektedir. Bu arayüzde ağ bağlantı bilgileri (IP adresi, RSSI), sensör ölçümleri (pH, TDS, sıcaklık, vb.) ve aktüatör durumları periyodik olarak görüntülenmektedir. Böylece harici bir bilgisayar veya mobil cihaza ihtiyaç duyulmadan sistemin temel çalışma durumu pano üzerinden doğrulanabilmektedir.

Sistemin açılış süreci ve LCD üzerinde gerçekleştirilen döngüsel veri gösterimine ait örnek görüntüler Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1: Sistem açılış ekranı ve LCD üzerinde döngüsel veri gösterimi.

5.2. Sensör Ölçüm Performansı ve Kalibrasyon Sonuçları

NFT hidroponik sistemlerde besin çözeltisinin kimyasal parametreleri olan pH ve EC/TDS değerleri, bitki gelişimini doğrudan etkileyen kritik değişkenlerdir. Bu parametrelerin hatalı ölçülmesi, kontrol algoritmalarının yanlış dozaj kararları üretmesine ve kök bölgesinde geri döndürülemez hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle çalışmada, sensörlerden elde edilen ham ölçümlerin fiziksel büyüklüklere dönüştürülme süreci ile kalibrasyon doğruluğu deneysel olarak incelenmiştir.

5.2.1. pH Sensörü Kalibrasyon Süreci ve Doğrulama Testi

Elektrokimyasal pH sensörlerinde zamanla oluşabilen ölçüm sapmalarını (drift) telafi etmek ve ölçüm doğruluğunu korumak amacıyla, sistemde iki noktalı (two-point) kalibrasyon yöntemi uygulanmıştır. Kalibrasyon işlemi, gömülü yazılım üzerinde çalışan Komut Satırı Arayüzü (CLI) aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve sensörün ürettiği ham voltaj değerleri bilinen referans çözeltilerle eşleştirilmiştir.

Kalibrasyon Metodolojisi

Kalibrasyon süreci aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. **Kalibrasyon Moduna Geçiş:** Seri port üzerinden cal komutu girilerek sistem kalibrasyon moduna alınmış; bu süreçte güvenlik amacıyla tüm dozaj pompaları yazılımsal olarak kilitlenmiştir.

2. **Asidik Referans Noktası (pH 4.00):** pH probu pH 4.00 tampon çözeltisine daldırılmış, ölçümün kararlı hâle gelmesi beklenmiş ve okunan ham ADC voltajı set ph4 <voltaj> komutu ile EEPROM belleğine kaydedilmiştir.
3. **Nötr Referans Noktası (pH 7.00):** Prob saf su ile temizlendikten sonra pH 7.00 tampon çözeltisine alınmış ve aynı işlem set ph7 <voltaj> komutu ile tekrarlanmıştır.
4. **Kalibrasyonun Sonlandırılması:** Kalibrasyon sürecinin tamamlanmasının ardından sistem, iki referans noktasına ait ölçüm verilerini kullanarak sensörün doğrusal dönüşüm parametrelerini yeniden hesaplamıştır.

Bu kapsamda, pH 4.00 ve pH 7.00 tampon çözeltilerinde elde edilen referans voltaj değerleri temel alınarak, sensörün eğim (slope) ve ofset (offset) katsayıları aşağıdaki doğrusal model üzerinden belirlenmiştir:

$$pH = mV + b \quad (5.1)$$

burada V sensör çıkış voltajını, m eğim katsayısını ve b ofset katsayısını ifade etmektedir. Eğim ve ofset katsayıları, iki referans noktası (V_4, pH_4) ve (V_7, pH_7) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$m = \frac{pH_7 - pH_4}{V_7 - V_4} \quad (5.2)$$

$$b = pH_4 - mV_4 \quad (5.3)$$

Hesaplanan bu katsayılar, kalıcı bellek (EEPROM) içerisine kaydedilmiş ve kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra exit komutu ile sistem normal çalışma moduna alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde sensör çıkışı, gerçek zamanlı ölçümlerde fiziksel pH değerine doğrusal ve tutarlı biçimde dönüştürülerek kontrol algoritmasına güvenilir giriş verisi sağlamaktadır.

Kalibrasyon sürecine ait seri port çıktıları ve sistem geri bildirimleri Şekil 5.2’de sunulmuştur.

```

10:08:59 -> cmd: cal
10:08:59 -> >>> MODE: CALIBRATION ●
10:08:59 -> [INFO] Pompalar kilitlendi. Güvenli mod aktif.

--- ADIM 1: pH 4.00 KALİBRASYONU ---
10:13:50 -> 🧪 Sensör Ham Voltaj: 2.08 V (Stabilizasyon Bekleniyor...)
10:13:55 -> 🧪 Sensör Ham Voltaj: 2.08 V
10:13:58 -> cmd: set ph4 2.08
10:13:58 -> ✅ pH 4.00 referans voltajı EEPROM'a kaydedildi.

--- ADIM 2: pH 7.00 KALİBRASYONU ---
10:15:30 -> 🧪 Sensör Ham Voltaj: 1.65 V (Stabilizasyon Bekleniyor...)
10:15:35 -> 🧪 Sensör Ham Voltaj: 1.65 V
10:15:38 -> cmd: set ph7 1.65
10:15:46 -> ✅ pH 7.00 referans voltajı EEPROM'a kaydedildi.
10:15:46 -> [INFO] Yeni Eğim (Slope) ve Ofset hesaplandı.

--- SONUÇ VE DOĞRULAMA ---
10:15:53 -> cmd: exit
10:15:53 -> >>> MODE: MANUAL ●
10:15:53.296 -> -----
10:15:53.296 -> 🌱 Sensörler -> pH: 7.00 | TDS: 847 ppm | Çöz.Sıcaklık:
18.7°C
10:15:53.330 -> 💧 Tank -> Seviye: 35% | Akış: 0.00 L/dk

```

Şekil 5.2: pH sensörü iki noktalı kalibrasyon süreci ve doğrulama logları.

Kalibrasyon modundan çıkıldığı anda (10:15:53), prob hâlen pH 7.00 tampon çözeltisi içerisinde. Sistem tarafından yeniden hesaplanan katsayılar ile gerçekleştirilen ilk ölçümde pH değerinin 7.00 olarak okunması, kalibrasyon işleminin matematiksel olarak doğru biçimde tamamlandığını ve sensörün yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan kalibrasyon yönteminin kontrol algoritmaları için yeterli ölçüm hassasiyeti sağladığını doğrulamaktadır.

5.2.2. Ortam İklimlendirme Kontrolü ve Histerezis Testi

Kapalı ortam tarım sistemlerinde fotosentez verimliliği ve bitki terleme (transpirasyon) süreçleri, ortam sıcaklığı ve bağıl neme doğrudan bağlıdır. Bu nedenle geliştirilen sistemde AHT10 sıcaklık–nem sensörü yalnızca pasif bir izleme bileşeni olarak değil; egzoz fanını tetikleyen aktif bir kontrol girdisi olarak değerlendirilmiştir. Böylece ortam iklimlendirmesi, sensör verilerine dayalı yerel karar mekanizmaları ile otomatik olarak yönetilmektedir.

Bu bölümde, ortam sıcaklığının tanımlanan eşik değerin üzerine çıkması durumunda sistemin verdiği tepki, fan kontrol algoritmasının kararlılığı ve histerezis davranışı deneysel olarak analiz edilmiştir.

Deneyler sırasında sistem Otomatik Modda çalıştırılmış ve fan tetikleme sıcaklık eşiği 26.0 °C olarak belirlenmiştir. Ortam sıcaklığında ani bir artış oluşturmak amacıyla sensör üzerine kontrollü bir ısı kaynağı uygulanmış, ardından bu kaynak ortamdan uzaklaştırılarak sistemin soğuma sürecindeki davranışı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.3'te sunulan seri port log kayıtları incelendiğinde, sistem davranışının aşağıdaki aşamalarla gerçekleştiği görülmektedir:

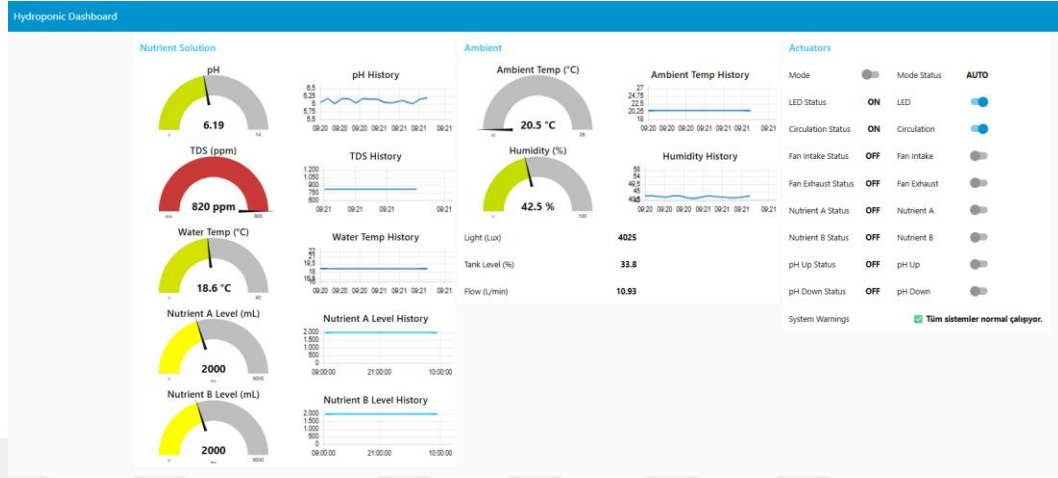
- 1. Normal Çalışma (09:22:35):** Ortam sıcaklığı 21.5 °C olarak ölçülmüş; sıcaklık eşik değerinin altında olduğundan egzoz fanı (Fan Out) kapalı (OFF) durumda kalmıştır.
- 2. Tetikleme Anı (09:22:38):** Yapay ısı kaynağının etkisiyle sıcaklık değeri kısa sürede 26.9 °C'ye yükselmiş; gömülü yazılımda çalışan sonlu durum makinesi (FSM) bu durumu aynı çevrim içerisinde algılayarak Fan Out rölesini aktif (ON) hâle getirmiştir.
- 3. Aktif Soğutma Süreci:** Sıcaklık 33.5 °C seviyesine kadar yükselmesine rağmen fan kesintisiz biçimde çalışmaya devam etmiş ve ortam sıcaklığının kontrollü şekilde düşürülmesini sağlamıştır.
- 4. Normalleşme ve Enerji Tasarrufu (09:23:32):** Ortam sıcaklığı tekrar 26.0 °C eşik değerine gerilediğinde, sistem fanı otomatik olarak devre dışı bırakmış ve gereksiz enerji tüketiminin önüne geçilmiştir.

09:22:35.038 ->		Ortam Sıcaklık: 21.5°C			Fan Out:OFF	[Normal Durum]
...						
09:22:38.683 ->		Ortam Sıcaklık: 26.9°C			Fan Out:ON	[⚠ EŞİK AŞILDI - FAN AKTİF]
09:22:42.235 ->		Ortam Sıcaklık: 27.0°C			Fan Out:ON	
09:22:45.838 ->		Ortam Sıcaklık: 33.5°C			Fan Out:ON	[Maksimum Sıcaklık]
09:22:49.468 ->		Ortam Sıcaklık: 32.8°C			Fan Out:ON	[Soğutma Devam Ediyor...]
...						
09:23:29.122 ->		Ortam Sıcaklık: 26.3°C			Fan Out:ON	
09:23:32.716 ->		Ortam Sıcaklık: 26.0°C			Fan Out:OFF	[✅ NORMALLEŞME]
09:23:36.318 ->		Ortam Sıcaklık: 25.7°C			Fan Out:OFF	

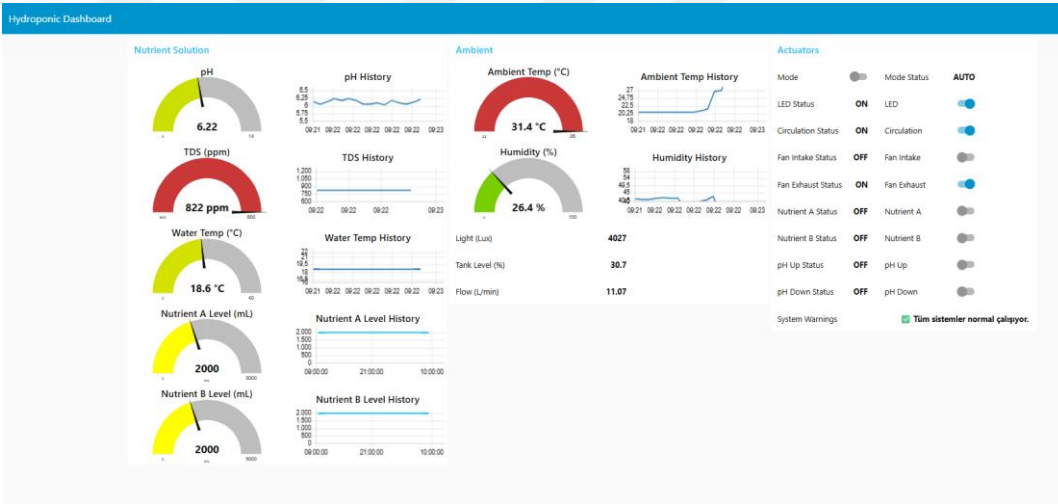
Şekil 5.3: Sıcaklık artışı ve otomatik fan kontrolüne ait seri port log kaydı.

Sistemin bu otonom davranışı, eş zamanlı olarak Node-RED Dashboard arayüzü üzerinden de doğrulanmıştır. Şekil 5.4'te, sıcaklık artışı öncesi normal çalışma durumu ile eşik aşımı sonrası soğutma sürecine ait arayüz görünümleri sunulmaktadır. Fan

durum göstergeleri ve sıcaklık ölçümlerinin, fiziksel sistemle senkronize biçimde ve 500 ms’den kısa gecikme ile güncellendiği gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4: Sıcaklık eşik değerinin aşılması durumunda Node-RED dashboard üzerinde fan durumunun değişimi (a) Fan açık (b) Fan kapalı.

Gerçekleştirilen deneyler, geliştirilen iklimlendirme kontrol mekanizmasının çevresel sıcaklık değişimlerine hızlı ve kararlı biçimde tepki verebildiğini göstermektedir. Ayrıca kontrol kararlarının internet bağlantısından bağımsız olarak, gömülü sistem üzerinde yerel olarak alınması; sistemin güvenilirliğini artırmakta ve ağ gecikmelerinden kaynaklanabilecek riskleri ortadan kaldırmaktadır. Bu sonuçlar,

kapalı ortam NFT hidroponik sistemler için tasarlanan kontrol mimarisinin pratik uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

5.2.3. Sirkülasyon Arızası ve Akış Güvenlik Testi

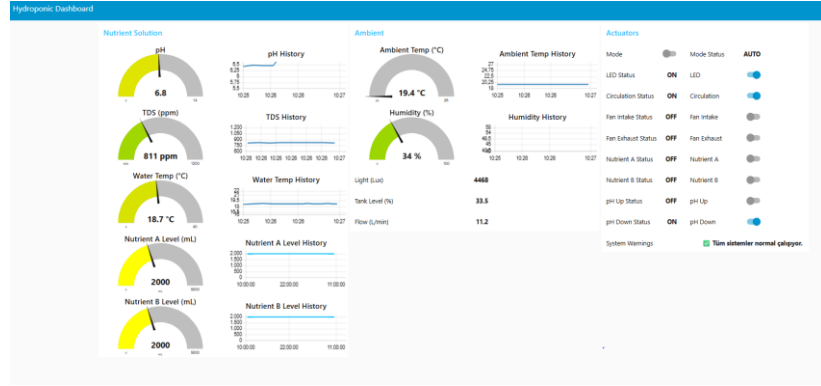
NFT hidroponik sistemlerde besin çözeltisinin sürekli sirkülasyonu, bitki köklerinin oksijenlenmesi ve homojen besin dağılımı açısından kritik öneme sahiptir. Sirkülasyonun durması, kısa sürede kök bölgesinde oksijen eksikliğine ve bitki stresine yol açabileceğinden, bu tür arızaların hızlı biçimde tespit edilmesi ve kullanıcıya bildirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen sistemde, akış sensöründen elde edilen verilere dayalı bir emniyet kilidi (safety interlock) mekanizması uygulanmıştır.

Bu testte, sistem tam yükte çalışırken sirkülasyon hattı fiziksel olarak kesilerek yapay bir tıkanıklık/pompa arızası senaryosu oluşturulmuş; gömülü yazılımın bu duruma verdiği tepki süresi, alarm üretme yeteneği ve kullanıcı arayüzüne yansımaları deneysel olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deney sırasında sistem davranışı aşağıdaki aşamalarla gözlemlenmiştir:

- 1. Normal Çalışma Durumu:** Sistem Otomatik Modda çalıştırılmış, sirkülasyon pompası aktif hâle getirilmiştir. Akış sensörü 11.2 L/dk debi ölçmüş ve sistem durumu kullanıcı arayüzünde “Normal” olarak raporlanmıştır (Şekil 5.5-a).
- 2. Hata Simülasyonu:** Su hattı üzerindeki vana manuel olarak kapatılarak sirkülasyon fiziksel olarak kesilmiş, buna bağlı olarak akış sensöründen gelen darbe (pulse) sinyalleri anlık olarak durmuştur.
- 3. Yerel Tespit ve Alarm Üretimi:** ESP32 üzerinde çalışan kesme (interrupt) tabanlı akış sayacı, debinin 0 L/dk seviyesine düştüğünü tespit etmiştir. Sonlu durum makinesi (FSM), bu durumu kritik bir arıza olarak değerlendirerek MQTT üzerinden [ALARM] Flow Error mesajını yayınlamıştır.
- 4. Arayüz Bildirimi:** Node-RED Dashboard, alınan alarm paketini işleyerek sistem durumunu “Sirkülasyon Akışı YOK!” uyarısına dönüştürmüş; görsel ve sesli ikazlar aracılığıyla kullanıcıyı bilgilendirmiştir (Şekil 5.5-b).

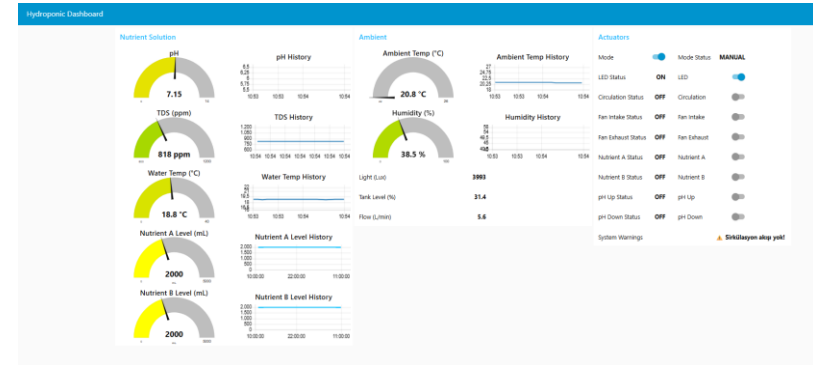
5. **Kullanıcı Müdahalesi:** Kullanıcı, arayüz üzerinden sistemi Manuel Moda alarak sirkülasyon pompasını kapatmış ve bakım prosedürünü başlatmıştır (Şekil 5.5-c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5: Akış güvenliği test senaryosu adımları: (a) Normal akış, (b) Akış kesintisi hatası, (c) Manuel moda geçiş.

Gerçekleştirilen testler, akış sensörüne dayalı emniyet mekanizmasının; sensör verisinin yerel olarak işlenmesi, arıza durumunun tespit edilmesi ve kullanıcıya

bildirilmesi süreçlerini 2 saniyeden kısa sürede başarıyla gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu sonuç, sistemin sirkülasyon kaynaklı kritik arızalara karşı hızlı ve güvenilir bir koruma katmanı sunduğunu ve yerel karar alma ile bulut tabanlı bildirim mekanizmalarının etkin biçimde bütünleştirildiğini doğrulamaktadır.

5.3. FSM Tabanlı Kontrol Davranışının Değerlendirilmesi

Geliştirilen hidroponik sistemin kontrol mimarisi, deterministik ve öngörülebilir bir karar yapısı sunan Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine – FSM) yaklaşımı üzerine inşa edilmiştir. Bu bölümde, tekil sensör veya aktüatör performanslarından ziyade; sistemin bütüncül kontrol davranışı, çalışma modları arasındaki geçişlerin güvenliği ve kullanıcı etkileşimi sırasında ortaya çıkan durumların tutarlılığı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Özellikle mod değişimlerinin kontrol algoritmaları üzerindeki etkisi ve olası çatışma durumlarının nasıl yönetildiği incelenmiştir.

5.3.1. Çalışma Modları Arası Geçiş ve Durum Koruma

Sistemin Otomatik, Manuel ve Kalibrasyon olmak üzere üç temel çalışma modu arasında güvenli ve kesintisiz biçimde geçiş yapabildiği doğrulanmıştır. Testler sırasında, kontrol yetkisinin yazılımdan kullanıcıya devredildiği anlarda oluşabilecek aktüatör çatışmaları ve kararsız durumlar özellikle gözlemlenmiştir.

Bu test senaryosunda sistem Otomatik Modda çalışırken, kullanıcı tarafından Node-RED arayüzü üzerinden Manuel Mod geçiş komutu gönderilmiştir. Bu senaryo kapsamında beklenen davranış, FSM'nin otomatik kontrol döngüsünü sonlandırması, otonom karar mekanizmalarını devre dışı bırakması ve aktüatörleri güvenli bir duruma alarak kontrol yetkisini kullanıcıya devretmesi şeklinde tanımlanmıştır.

Yapılan gözlemler sonucunda, seri port log kayıtları incelendiğinde FSM'nin MODE_AUTO durumundan MODE_MANUAL durumuna tek adımda geçiş yaptığı ve bu geçiş sırasında sistemin çalışmasını etkileyen herhangi bir resetlenme, watchdog tetiklenmesi veya bellek hatası oluşmadığı görülmüştür. Geçişin ardından aktüatör kontrolü yalnızca kullanıcı komutlarına bağlı hâle gelmiş ve otomatik kontrol fonksiyonları pasif duruma alınmıştır.

Bu durum, FSM tabanlı kontrol mimarisinin modlar arası yetki devrini kararlı ve öngörülebilir biçimde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

```
14:45:10 -> >>> 🚗 AUTO MOD Çalışıyor (Döngü Aktif)
14:45:10 -> ⚙️ Karar: pH Düşük -> pH Pompası ON
...
14:45:12 -> [MQTT] Komut Alındı: SET_MODE_MANUAL14
:45:12 -> [INFO] FSM Durum Değişikliği: AUTO -> MANUAL1
4:45:12 -> 🛑 Tüm Pompalar Durduruldu (Güvenlik Protokolü)
14:45:12 -> >>> 🛑 MANUAL MOD Aktif - Kullanıcı Yetkili
14:45:15 -> [MQTT] Komut: FAN_IN_ON
14:45:15 -> ⚙️ Fan In: ON (Manuel Tetikleme)
```

Şekil 5.6: Otomatik moddan manuel moda geçiş ve yetki devri log kaydı.

5.3.2. Manuel Kontrol ve Eylem-Doğrulama Testi

IoT tabanlı kontrol sistemlerinde manuel müdahalelerin güvenilirliği, yalnızca komutun iletilmesiyle değil; tetiklenen fiziksel eylemin sensör verileriyle doğrulanabilmesiyle değerlendirilmektedir. Bu bağlamda geliştirilen sistemde, manuel kontrol mekanizmasının kapalı çevrim (closed-loop) yapıda çalışıp çalışmadığı deneysel olarak test edilmiştir.

Bu test senaryosunda, mobil uygulama üzerinden gönderilen LED aydınlatma açma komutunun hem ilgili aktüatörün durumunda hem de ortam ışık şiddesinde ölçülebilir bir değişim oluşturup oluşturmadığı analiz edilmiştir. Fiziksel geri besleme, BH1750 ışık sensöründen elde edilen lux verileri üzerinden doğrulanmıştır.

Yapılan deneyler sırasında sistem Manuel Modda çalışırken LED aydınlatma kapalı konumdadır. Mobil uygulama üzerinden LED açma komutu gönderilmiş; seri port logları üzerinden röle durum bilgisi ile ışık şiddeti ölçümleri eş zamanlı olarak izlenmiştir.

Elde edilen log kayıtları incelendiğinde (Şekil 5.7), komut gönderilmeden önce LED rölesinin kapalı olduğu ve ortam ışık seviyesinin düşük olduğu görülmektedir. Komutun işlenmesinin ardından LED rölesi aktif hâle gelmiş ve aynı ölçüm döngüsü içerisinde ışık sensörü tarafından anlamlı bir lux değeri raporlanmıştır. Bu durum, yazılımsal kontrol komutunun fiziksel bir çıktıya dönüştüğünü ve sonucunun sensör geri bildirimi ile doğrulandığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, geliştirilen sistemin yalnızca tek yönlü bir komut-iletim yapısına sahip olmadığını; manuel müdahalelerin sonuçlarını sensör verileriyle doğrulayan kapalı

çevrim bir kontrol yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yapı, kullanıcı arayüzü üzerinden verilen komutların sistemin gerçek durumu ile tutarlı biçimde izlenebilmesini sağlayarak insan-makine etkileşiminin güvenilirliğini artırmaktadır.

```
11:29:44.329 -> ⚙ Aktüatör: LED:OFF | 💡 Işık: 0 lx [Komut Öncesi]
...
(Kullanıcı Mobil Uygulamadan "AÇ" Butonuna Basar)
...
11:29:47.933 -> ⚙ Aktüatör: LED:ON | 💡 Işık: 4208 lx [✅ EYLEM GERÇEKLEŞTİ]
11:29:51.570 -> ⚙ Aktüatör: LED:ON | 💡 Işık: 4169 lx [Aydınlatma Stabil]
```

Şekil 5.7: Manuel LED kontrolü ve sensör geri besleme log kaydı.

Bu test, geliştirilen sistemin sadece tek yönlü (fire-and-forget) bir kontrol yapısına sahip olmadığını; eylemlerin sonuçlarını sensör verileriyle doğrulayan kapalı çevrim (closed-loop) bir izleme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

5.4. Uzaktan İzleme, Veri Kaydı ve Ağ Performansı Testleri

Geliştirilen sistemin bir IoT cihazı olarak değerlendirilebilmesi için yalnızca yerel kontrol yeteneklerine sahip olması yeterli değildir; sensör verilerinin uzak sunucuya aktarılması, gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi ve uzun vadeli analizlere olanak sağlayacak biçimde kaydedilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, sistemin haberleşme altyapısı, sunucu tabanlı izleme arayüzleri ve ağ koşullarına karşı gösterdiği dayanıklılık deneysel olarak incelenmiştir.

Bu bölümde gerçekleştirilen testler; MQTT tabanlı veri iletiminin sürekliliği, Node-RED ve Grafana arayüzleri üzerinden sağlanan izleme yetenekleri ve ağ kesintileri sırasında veri bütünlüğünün korunması başlıkları altında değerlendirilmiştir.

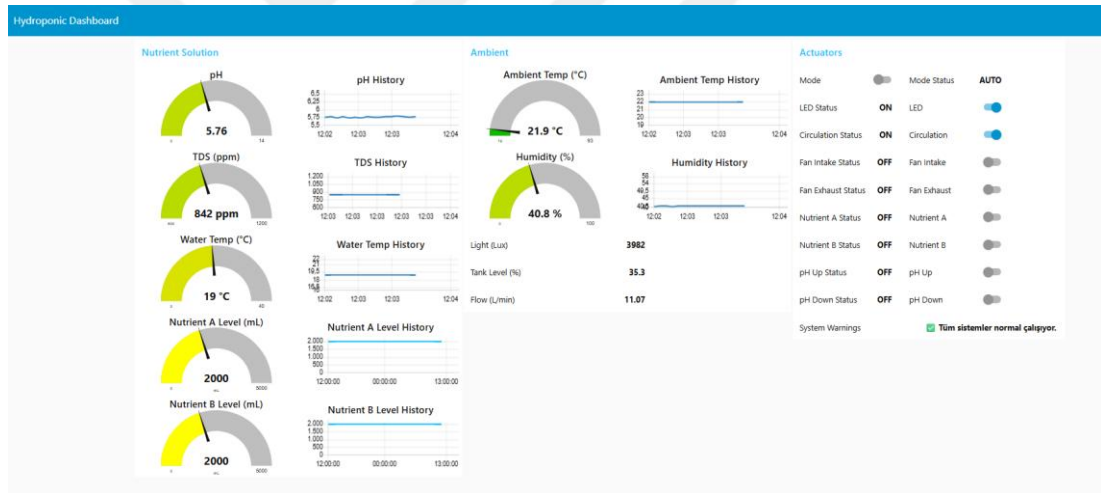
5.4.1. Node-RED ile Gerçek Zamanlı Sistem İzleme

Sistemin kullanıcı arayüzü olarak tasarlanan Node-RED Dashboard'un, ESP32 tarafından yayınlanan sensör ve aktüatör verilerini tutarlı ve kullanıcı tarafından anlamlı biçimde sunup sunmadığı test edilmiştir. Bu amaçla, gömülü kontrol birimi

tarafından MQTT protokolü üzerinden periyodik olarak yayınlanan sensör verilerinin arayüz üzerindeki yansımaları gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen testler sonucunda pH, TDS, ortam sıcaklığı ve aktüatör durum bilgileri dashboard ekranında kesintisiz olarak güncellenmiş; eşik değerlerin aşılması durumunda görsel göstergelerin (renk değişimi, durum mesajları) otomatik olarak devreye girdiği doğrulanmıştır. Bu bağlamda Node-RED paneli üzerinde oluşturulan gerçek zamanlı izleme ekranı ve ilgili bileşenlerin (gauge, chart, switch) çalışma örneği Şekil 5.8’de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, Node-RED Dashboard’un sistemin anlık durumunu izlemek ve kullanıcıya hızlı geri bildirim sağlamak açısından yeterli bir arayüz sunduğunu ortaya koymaktadır. İzleme katmanının kontrol katmanından bağımsız ancak onunla senkronize çalışması, sistemin uzaktan yönetilebilirliğini ve operasyonel güvenilirliğini artırmaktadır.



Şekil 5.8: Node-RED dashboard üzerinde anlık sistem parametrelerinin izlenmesi.

5.4.2. Grafana ve InfluxDB ile Uzun Dönem Veri Analizi

Akıllı tarım uygulamalarında sistem başarısının temel göstergesi, yalnızca anlık kontrol tepkileri değil; günler veya haftalar boyunca sürdürülen işletim sürecinde sensör verilerinin kararlılığı ve çevresel parametreler arasındaki tutarlı ilişkidir. Bu doğrultuda, geliştirilen sistemden elde edilen tüm kritik ölçümler (pH, TDS, besin çözeltisi sıcaklığı, ortam sıcaklığı, bağıl nem ve ışık şiddeti) InfluxDB üzerinde zaman serisi verisi olarak depolanmış ve Grafana platformu üzerinden bütünsel biçimde analiz edilmiştir.

Sistem, kesintisiz çalışma senaryosu altında yedi günlük bir gözlem süresine tabi tutulmuş; bu süreçte hem çevresel değişkenler arasındaki korelasyonlar hem de planlı enerji kesintilerine karşı sistem davranışı değerlendirilmiştir.

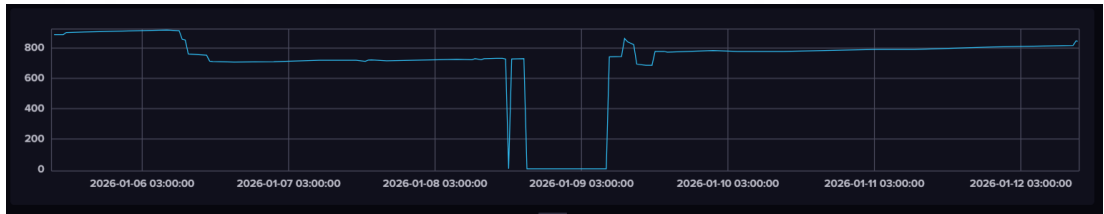
Deneysel Bulgular ve Veri Analizi

Şekil 5.9’da sunulan çok parametrelili zaman serisi grafiği incelendiğinde aşağıdaki teknik çıkarımlar elde edilmiştir:

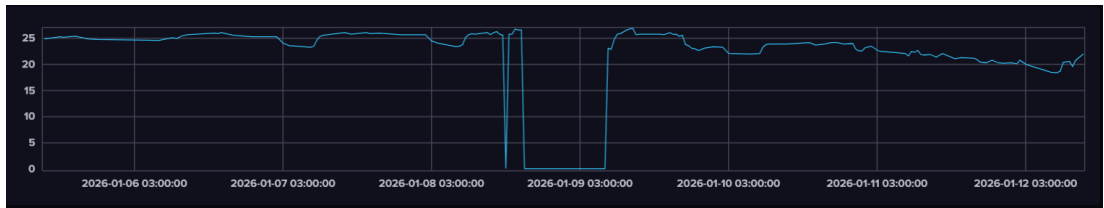
- 1. Parametreler Arası Korelasyon:** Işık şiddetinin (Lux) yükseldiği zaman dilimlerinde ortam sıcaklığının arttığı, buna karşılık bağıl nemin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu beklenen fiziksel ilişki, çevresel sensörlerin doğru kalibre edildiğini ve ortam değişimlerini tutarlı biçimde yansıttığını göstermektedir.



(a)

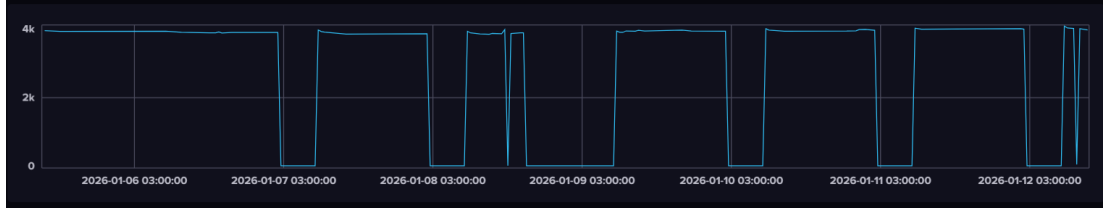


(b)



(c)

Şekil 5.9: Tüm sistem sensörlerinin uzun dönemli (7 gün) değişim grafiği ve enerji kesintisi sonrası sistemin tepkisi (a) pH, (b)TDS, (c) ortam sıcaklığı, (d) Işık şiddeti.



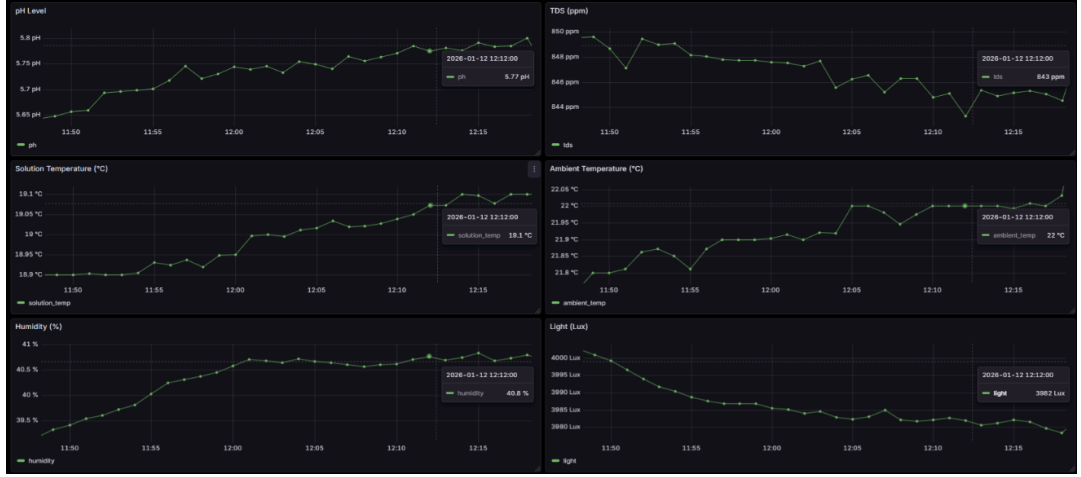
(d)

Şekil 5.9: Devamı

2. **Enerji Kesintisi ve Soğuk Başlatma (Cold Start) Davranışı:** Grafik üzerinde yer alan yaklaşık bir saatlik veri boşluğu, sistemde uygulanan planlı bir enerji kesintisi ve bakım senaryosunu temsil etmektedir. Bu süreçte tüm sensör verilerinin eş zamanlı olarak sunucuya iletiminin durduğu; enerji geri geldiğinde ise sensörlerin herhangi bir veri bozulması veya kalibrasyon kaybı olmaksızın ölçüm üretmeye devam ettiği gözlemlenmiştir. Sistem, yeniden başlatma sonrasında ağ bağlantısını otomatik olarak kurarak veri akışını sürdürmüştür.
3. **Kimyasal Kararlılık:** pH ve TDS değerlerinin, ışık ve sıcaklık gibi çevresel değişkenlerden bağımsız olarak tanımlanan histerezis bantları içerisinde kaldığı ve uzun dönem boyunca belirgin bir sürüklenme (drift) göstermediği doğrulanmıştır. Bu durum, kontrol algoritmasının kimyasal dengeyi kararlı biçimde koruyabildiğini göstermektedir.

Bu bulgular, sistemin yalnızca ideal işletim koşullarında değil; enerji kesintileri veya bakım duruşları sonrasında da kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymadan normal çalışma durumuna dönebildiğini ortaya koymaktadır.

Sistemin örnekleme sıklığını ve sensörler arası zamansal uyumunu değerlendirmek amacıyla, yedi günlük veri kümesinden seçilen 30 dakikalık bir zaman aralığı üzerinde ayrıntılı bir mikro analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analize ait çoklu sensör verileri Şekil 5.10'da sunulmaktadır.



Şekil 5.10: Sensörlerin 30 dakikalık yüksek çözünürlüklü izleme grafiği (Grafana).

Grafik üzerinden elde edilen başlıca gözlemler aşağıda özetlenmiştir:

- **Gürültü Davranışı:** pH ve TDS ölçümlerinde ani sıçramalar veya kararsız dalgalanmalar gözlemlenmemiştir. Bu durum, analog ölçümlere uygulanan yazılımsal filtreleme ve kararlılık denetim mekanizmalarının etkin çalıştığını göstermektedir.
- **Veri Sürekliliği:** İncelenen 30 dakikalık periyot boyunca tüm sensörlerden kesintisiz veri elde edilmiş; zaman serisi grafiklerinde kopukluk veya zaman aşımı oluşmamıştır. Bu sonuç, ESP32 tabanlı sistemin eş zamanlı sensör okuma ve kablosuz veri iletimini kararlı biçimde yürütebildiğini ortaya koymaktadır.
- **Zamansal Senkronizasyon:** Ortam sıcaklığı, nem ve ışık gibi çevresel parametrelerin değişimlerinin aynı zaman damgası ile kaydedildiği görülmüş; sensörler arasında zamansal uyumsuzluğa rastlanmamıştır.

Bu analizler, geliştirilen sistemin hem uzun hem de kısa zaman ölçeklerinde kararlı, senkronize ve güvenilir veri üretme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

5.4.3. Ağ Kopukluğu ve Veri Sürekliliği Senaryosu

IoT tabanlı tarımsal sistemlerde sürekli internet bağlantısına bağımlılık, özellikle kontrol kararlarının uzaktan alındığı mimarilerde ciddi bir risk oluşturmaktadır. Hidroponik sistemlerde ağ bağlantısının kesilmesi sırasında sirkülasyonun veya pH kontrolünün devre dışı kalması, kısa süre içerisinde bitki sağlığını olumsuz

etkileyebilmektedir. Bu riskin azaltılması amacıyla geliştirilen sistem, tüm kontrol kararlarının uç birim (edge) üzerinde alındığı; sunucu katmanının ise yalnızca izleme, kayıt ve kullanıcı arayüzü işlevlerini üstlendiği yerel öncelikli (local-first) bir mimari anlayışıyla tasarlanmıştır.

Sistemin çevrimdışı çalışma kararlılığını ve hata toleransını doğrulamak amacıyla, sistem Otomatik Mod'da tam yük altında çalışırken ağ bağlantısı fiziksel olarak kesilerek bir stres testi uygulanmıştır. Bu süreçte oluşan sistem davranışları ve durum geçişleri, Şekil 5.11'de sunulan seri port log kayıtları üzerinden analiz edilmiştir.

Log kayıtlarının ayrıntılı incelenmesi sonucunda, ağ bağlantısının kesildiği anda (08:21:21) MQTT istemcisinin bağlantı hatası üretmesine rağmen sistemin ana döngüsünün kilitlenmediği; sensör okuma ve FSM tabanlı kontrol görevlerinin kesintisiz biçimde yürütüldüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgu, sistemde kullanılan non-blocking zamanlama yapısının etkin biçimde çalıştığını göstermektedir.

Ağ bağlantısı kesilmiş olmasına rağmen sistemin yerel sensör verilerini temel alarak sirkülasyon pompası ve aydınlatma sistemlerini aktif durumda tutmaya devam ettiği belirlenmiştir. Bu gözlem, kontrol algoritmasının bulut veya sunucu erişimine bağımlı olmadan çalışabildiğini ve kritik kontrol kararlarının tamamen yerel düzeyde alınabildiğini ortaya koymaktadır.

```

08:21:17.846 -> >>> 🤖 AUTO MOD Çalışıyor (Normal Durum)
08:21:17.846 -> 🌱 Sensörler -> pH: 6.15 | Sıcaklık: 18.5°C | Nem: 41.7%
08:21:17.883 -> [INFO] Sensor & actuator JSON published successfully
...
[...Sistem normal çalışmaya devam ediyor...]
...
08:21:21.445 -> [WARN] MQTT disconnected 08:21:21.445 -> [WARN] MQTT disconnected
08:21:21.445 -> ❌ MQTT: Bağlanılamadı, hata kodu = -2
08:21:21.445 -> =====
08:21:21.445 -> >>> 🤖 AUTO MOD Çalışıyor (BAĞLANTI KOPTUĞUNDA ÇALIŞMA) 08:21:21.445
-> -----
08:21:21.445 -> 🌱 Sensörler -> pH: 6.16 | TDS: 824 ppm | Sıcaklık: 18.4°C
08:21:21.490 -> ⚙️ Aktüatörler -> LED:ON | Fan In:OFF | Circ:ON (YEREL KONTROL AKTİF)
08:21:21.525 -> [WARN] MQTT disconnected - sensor data not sent
...
[...Bağlantı kopukluğu süresince yerel döngü devam ediyor...]
...
08:21:36.592 -> >>> 🤖 AUTO MOD Çalışıyor
08:21:36.592 -> 🌱 Sensörler -> pH: 6.17 | TDS: 823 ppm
08:21:36.594 -> ❌ MQTT: Bağlanılamadı, hata kodu = -2
...
08:21:39.678 -> ✅ MQTT broker bağlantısı kuruldu (BAĞLANTI GELDİ)
08:21:39.678 -> [INFO] Sensor & actuator JSON published successfully
08:21:43.111 -> >>> 🤖 AUTO MOD Çalışıyor
08:21:43.111 -> 🌱 Sensörler -> pH: 6.21 | TDS: 825 ppm

```

Şekil 5.11: Ağ bağlantı kesintisi esnasında sistem durum logları ve yerel kontrol tepkileri.

Otomatik İyileşme (Auto-Recovery): Ağ bağlantısının yeniden sağlanmasının ardından (08:21:39), sistem herhangi bir manuel müdahale veya yeniden başlatma gerektirmeden MQTT broker'a tekrar bağlanmış ve telemetri verilerini sunucuya göndermeye devam etmiştir. Bu süreçte sensör ölçümlerinde veya sistem durumunda tutarsızlık gözlemlenmemiştir.

Bu test sonuçları, geliştirilen hidroponik sistemin ağ kopukluğu gibi olumsuz senaryolarda dahi temel kontrol işlevlerini yerel olarak sürdürebildiğini ve bağlantı yeniden sağlandığında veri akışını otomatik biçimde devam ettirebildiğini göstermektedir. Böylece sistem, gerçek saha koşullarında karşılaşılabilecek ağ kesintilerine karşı dayanıklı ve güvenilir bir IoT mimarisi sunmaktadır.

6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, geleneksel topraksız tarım yaklaşımlarının IoT ve gömülü sistem teknolojileri ile bütünleştirilerek otonom, izlenebilir ve uzaktan yönetilebilir bir hidroponik üretim sistemine dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen NFT tabanlı sistem üzerinde gerçekleştirilen donanım tasarımı, yazılım geliştirme çalışmaları ve deneysel testler sonucunda, çalışmanın başlangıcında belirlenen hedeflerin büyük ölçüde karşılandığı görülmüştür.

Önerilen FSM tabanlı kontrol mimarisi sayesinde; pH, TDS, sıcaklık ve sirkülasyon gibi hidroponik üretim açısından kritik parametreler, sürekli kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duyulmadan yönetilebilmiştir. Deneysel bulgular, sistemin bu parametreleri hedef aralıklar içerisinde kararlı bir biçimde tutabildiğini ve ani çevresel değişimlere karşı öngörülebilir tepkiler üretebildiğini göstermektedir.

MQTT protokolü ve uygun QoS politikaları kullanılarak oluşturulan haberleşme altyapısı, düşük bant genişliğine sahip ağ koşullarında dahi güvenilir bir veri iletimi sağlamıştır. Ağ kopukluğu senaryolarında yapılan testler, sistemin kontrol kararlarını uç birim (edge) üzerinde almaya devam ettiğini; bağlantının yeniden sağlanmasının ardından ise sunucu katmanı ile veri senkronizasyonunun otomatik olarak sürdürülebildiğini ortaya koymuştur. Bu yapı, sistemin bulut bağımlılığını azaltarak saha koşullarında daha dayanıklı bir çalışma karakteri sergilemesini sağlamaktadır.

Sistem güvenliği açısından geliştirilen yazılımsal kilitleme (software interlock) ve akış izleme mekanizmaları, sirkülasyon kaybı veya anormal sensör durumlarında aktüatörlerin kontrollü biçimde devre dışı bırakılmasını mümkün kılmıştır. Bu sayede hem bitki sağlığını hem de donanım bütünlüğünü korumaya yönelik önleyici bir güvenlik katmanı oluşturulmuştur.

Kullanıcı etkileşimi boyutunda ise Flutter tabanlı mobil uygulama ve Node-RED tabanlı web arayüzü sayesinde sistemin uzaktan izlenmesi ve yönetilmesi mümkün hâle getirilmiştir. Gerçek zamanlı izleme, manuel müdahale ve alarm bildirimlerinin tek bir bütünleşik yapı altında sunulması, geliştirilen sistemin pratik kullanım değerini artırmıştır.

6.2. Literatürle Karşılaştırma ve Özgün Değer

Bu tez kapsamında geliştirilen IoT tabanlı NFT hidroponik sistem, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında; kontrol mimarisi, sistem emniyeti ve yazılım–donanım bütünleşme düzeyi açısından belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır. Literatürde incelenen bazı çalışmalarda sensör verilerinin internet üzerinden izlenmesi başarıyla gerçekleştirilmiş olsa da bu sistemlerin büyük bir bölümünde ölçüm verilerine dayalı otonom müdahale mekanizmalarının sınırlı olduğu görülmektedir. Geliştirilen sistemde ise, FSM tabanlı kontrol yapısı sayesinde sensör verileri yalnızca izlenmekle kalmayıp, kimyasal dozajlama ve iklimlendirme süreçleri doğrudan bu veriler üzerinden otomatik olarak yönetilebilmektedir. Bu yönüyle sistem, pasif izleme odaklı yaklaşımlardan ayrılarak kapalı çevrim çalışan bir kontrol yapısı sunmaktadır.

Literatürdeki birçok çalışmada NFT sistemleri için kritik öneme sahip olan sirkülasyon sürekliliği doğrudan ele alınmamış veya yalnızca izleme düzeyinde değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında ise sirkülasyon kesintileri, sistem güvenliği açısından temel bir risk faktörü olarak ele alınmış ve akış sensörü verisine dayalı yazılımsal bir emniyet kilidi mekanizması geliştirilmiştir. Deneysel testler, akış kaybı durumunda sistemin otomatik olarak koruma durumuna geçebildiğini ve kullanıcıyı zamanında uyardığını göstermiştir. Bu yaklaşım, sistemin yalnızca fonksiyonel değil aynı zamanda güvenli bir yapıda çalışmasına katkı sağlamaktadır.

Önerilen mimarinin bir diğer ayırt edici özelliği, kontrol kararlarının bulut platformlarına bağımlı olmaksızın uç birim üzerinde alınmasıdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bulut merkezli kontrol yaklaşımlarının aksine, bu çalışmada benimsenen yerel öncelikli (local-first) yapı sayesinde ağ kopukluğu gibi durumlarda dahi sistem temel kontrol işlevlerini sürdürebilmektedir. Bu özellik, geliştirilen sistemin saha koşullarında daha dayanıklı ve öngörülebilir bir çalışma karakteri sergilemesini sağlamaktadır.

Yazılım altyapısı açısından değerlendirildiğinde, çalışmada hazır IoT platformları yerine Node-RED, InfluxDB ve Flutter tabanlı özgün bir yapı tercih edilmiştir. Bu tercih, sensör verilerinin saniyelik çözünürlükte kaydedilmesine, uzun dönemli eğilim analizlerinin gerçekleştirilmesine ve kullanıcı etkileşiminin esnek biçimde tasarlanmasına olanak tanımıştır. Sonuç olarak geliştirilen sistem, literatürdeki benzer

uygulamalara kıyasla daha bütüncül, güvenli ve genişletilebilir bir IoT tabanlı hidroponik kontrol çözümü sunmaktadır.

6.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistem, modüler mimarisi sayesinde ileride farklı araştırma ve uygulama alanlarına genişletilebilecek bir altyapı sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, sistemin algılama ve karar verme yeteneklerinin artırılması amacıyla, görsel algılama tabanlı yöntemlerin entegrasyonu önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilebilir. Bu kapsamda sisteme eklenecek bir kamera modülü ile bitki yaprak renklerinin ve morfolojik özelliklerinin izlenmesi; görüntü işleme veya derin öğrenme tabanlı algoritmalar aracılığıyla hastalık belirtilerinin erken tespiti ve büyüme performansının nicel olarak değerlendirilmesi mümkün olabilir.

Mevcut sistemde kullanılan kural tabanlı kontrol yaklaşımı, belirlenen eşik değerler çerçevesinde kararlı bir çalışma sağlamaktadır. Bununla birlikte, ilerleyen aşamalarda InfluxDB üzerinde biriken uzun dönemli verilerden faydalanılarak makine öğrenimi tabanlı öngörü modelleri geliştirilebilir. Bu modeller sayesinde pH ve TDS gibi parametrelerde oluşabilecek değişimlerin önceden tahmin edilmesi ve dozajlama kararlarının daha proaktif bir biçimde alınması hedeflenebilir. Böyle bir yaklaşım, kontrol performansının artırılmasının yanı sıra kimyasal tüketiminin optimize edilmesine de katkı sağlayabilir.

Enerji verimliliği açısından, sistemin güç tüketiminin detaylı olarak analiz edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi de gelecekte ele alınabilecek bir diğer çalışma alanıdır. Güneş paneli ve batarya yönetim sistemlerinin entegrasyonu ile şebekeden bağımsız çalışan hibrit bir yapı oluşturulması, özellikle kırsal bölgelerde sistemin uygulanabilirliğini artıracaktır.

Ölçeklenebilirlik bağlamında ise, büyük ölçekli sera uygulamaları için tek bir merkezi kontrolcü yerine, ESP-NOW veya Zigbee gibi düşük güç tüketimli kablosuz haberleşme protokolleri kullanılarak dağıtık sensör ve aktüatör ağlarının oluşturulması önerilebilir. Bu tür bir dağıtık mimari hem kapsama alanının genişletilmesine hem de sistemin arıza toleransının artırılmasına olanak tanıyacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile geliştirilen sistem; ileride görüntü işleme, makine öğrenimi, enerji yönetimi ve dağıtık ağ yapıları ile desteklenerek daha akıllı, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir tarım çözümlerine temel oluşturabilecek nitelikte bir altyapı sunmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Austria, A. C. H., Fabros, J. S., Sumilang, K. R. G., Bernardino, J., Doctor, A. C. (2023), “Development of IoT smart greenhouse system for hydroponic gardens”, *International Journal of Computing Sciences Research*, 7, 2111–2136.
- [2] Agbayani, L. S. T. (2024), “ThingSpeak-based monitoring IoT system for hydroponics system”, *7th International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*, 421–426, Honolulu, HI, USA, 15–17 March.
- [3] Blancaflor, E., Jamena, J. N. D., Banganay, K. N. U., Rabanal, R. S. C., Fernandez, K. E., Zamora, S. L. G. (2022), “An IoT monitoring system designed for hydroponics plant cultivation”, *5th International Conference on Computing and Big Data (ICCBD)*, 102–106, Shanghai, China, 16–18 December.
- [4] Vineeth, P., Ananthan, T. (2023), “Automated hydroponic system using IoT for indoor farming”, *4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 369–373, Coimbatore, India, 6–8 July.
- [5] Jain, S., Kaur, M. (2024), “Design and implementation of an IoT-based automated EC and pH control system in an NFT-based hydroponic farm”, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14 (1), 13078–13081.
- [6] Mendon, A., Votavat, B. M., Singh, S. (2022), “Design and construction of automated hydroponics system with remote monitoring and control”, *13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–6, Mumbai, India, 11–13 July.
- [7] Samadder, J., Gharami, S., Roy, S., Das, J. C. (2024), “IoT-driven automated hydroponic system for climate-independent indoor crop cultivation”, *IEEE International Conference of Electron Devices Society Kolkata Chapter (EDKCON)*, 1–6, Kolkata, India, 16–17 February.
- [8] Abul-Soud, M. A., Emam, M. S. A., Mohammed, S. M. (2021), “Smart hydroponic greenhouse (sensing, monitoring and control) prototype based on Arduino and IoT”, *International Journal of Plant & Soil Science*, 33 (4), 63–77.
- [9] Kanagaraj, V., Nareshbabu, G., Jaswant Kumar, S. R., Chandni, D. N., Krithik Sankar, R. (2023), “Design and development of an automated hydroponics system based on IoT with data logging”, *2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, 1373–1378, Thandalam, India, 9–11 May.
- [10] Mabrook, A. K., Dhannia, T., Santosh Kumar, M. B. (2022), “Hydroponic intelligent portable system (HIPS)”, *IEEE 19th India Council International Conference (INDICON)*, 1–6, Kochi, India, 17–19 December.
- [11] Wijaya, I. G. K. G. P., Hendrawan, I. N. R., Gautama, I. M. B., Budhi, I. M. A., Arsa, I. G. N. W. (2022), “Prototype NFT/DFT hydroponic data collection using IoT

system”, 4th International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 1–6, Medan, Indonesia, 8–9 October.

[12] Jagadesh, M., Karthik, M., Manikandan, A., Nivetha, S., Prasanth Kumar, R. (2018), “IoT based aeroponics agriculture monitoring system using Raspberry Pi”, *International Journal of Creative Research Thoughts*, 6 (1), 601–608.

[13] Nirbita, P., Chan, K. Y., Thien, G. S. H., Lee, C. L. (2024), “Smart hydroponic farming system integrated with LED grow lights”, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 32 (2), 685–701.

[14] Dhote, S. (2025), “Developing an integrated AI model for predictive maintenance in hydroponics”, *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7 (6), 2582–2160.

[15] Changmai, T., Gertphol, S., Chulaka, P. (2018), “Smart hydroponic lettuce farm using Internet of Things”, 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST-2018), 231–236, Chiang Mai, Thailand, 31 January – 3 February.

[16] Tembe, S., Khan, S., Acharekar, R. (2018), “IoT based automated hydroponics system”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9 (2), 67–71.

[17] Supriyanto, A., Fathurrahmani, F. (2019), “The prototype of greenhouse smart control and monitoring system in hydroponic plants”, *Jurnal Teknologi Informasi & Komunikasi Digital Zone*, 10 (2), 131–143.

[18] Anitha, M. L., Jnaneshwari, A., Harshitha, S. R., Nagesha, B. M. (2022), “IoT based automated hydroponic system using light intensity for lettuce growth”, 4th International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), 1–5, Mandya, India, 26–27 December.

[19] Purwalaksana, A. Z., Silaen, E., Gurning, T. E., Tobing, P., Silalahi, A. O., Simatupang, F. (2024), “IoT System for Floating Raft Hydroponics: Nutrient Monitoring and Automation”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2866 (1), 012042.

[20] Bhadra, S., Bridges, G. E., Thomson, D. J., Freund, M. S. (2011), “Electrode potential-based coupled coil sensor for remote pH monitoring”, *IEEE Sensors Journal*, 11 (11), 2813–2819.

[21] Agbayani, L. S. T., Villaverde, F. F. (2022), “Effect of lettuce on different recirculation intervals of an IoT-based hydroponics system using deep flow technique”, *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 1–6, Mumbai, India, 1–3 July.

[22] Kuankid, S., Aurasopon, A. (2022), “The effect of LED lighting on lettuce growth in a vertical IoT-based indoor hydroponic system”, *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 18 (7), 83–96.

- [23] Sandhiyadevi, P., Sowmiya, S., Gokul, S., Sushmeethaa, M. (2023), “Automation in smart hydroponic greenhouse and soilless farming”, *International Research Journal of Education and Technology*, 5 (10), 120–127.
- [24] Sobri, N. A., Mansor, Z., Ahmad, I., Rahman, A. H. A. (2022), “Development of hydroponics system and data monitoring using Internet of Things”, *IEEE 8th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, 345–349, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–24 August.
- [25] Purwalaksana, A. Z., Gurning, T. E., Silaen, E., Tobing, P., Silalahi, A. O., Simatupang, F. (2022), “Automated nutrition doser for hydroponic system based on IoT”, *IEEE International Conference of Computer Science and Information Technology (ICOSNIKOM)*, 1–6, Laguboti, North Sumatra, Indonesia, 19-21 October.
- [26] Patil, N., Patil, S., Uttekar, A., Suryawanshi, A. R. (2020), “Monitoring of hydroponics system using IoT technology”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7 (6), 1455–1458.
- [27] Rafi, B. A., Sarosa, M., Sumari, A. D. W. (2024), “Implementation of an IoT-Based High Efficiency and Low Maintenance Lettuce Hydroponic System”, *2024 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, 14–18, Malang, Indonesia, 12–13 September.
- [28] Suranata, I. W. A., Prathama, G. H., Wardana, I. N. K., Aryanto, K. A. A., Iskandar, R. X., Putra, I. M. S. A. (2024), “A low-cost system for hydroponic nutrient solution monitoring”, *2024 10th International Conference on Smart Computing and Communication (ICSCC)*, 227–231, Bali, Indonesia, 25-27 July.
- [29] Ruengittinun, S., Phongsamsuan, S., Sureeratanakorn, P. (2017), “Applied internet of thing for smart hydroponic farming ecosystem (HFE)”, *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*, 1–4, Pattaya, Thailand, 01-04 August.
- [30] Nair, B. M., Sujatha, R., Ipe, A. (2023), “Design and development of unmanned hydroponic setup using IoT”, *2023 International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT)*, 1–4, Gharuan, India, 05-06 May.
- [31] Rismayani, Hasyrif, S. Y., Nurhidayani, A., Nirwana (2022), “Development of monitoring system for room temperature, pH and water level hydroponic cultivation using IoT method”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics (ICEBEHI 2021)*, 311–322, Surabaya, Indonesia, 3–4 November.
- [32] Villanueva, L., Lofranco, R. R. J., Lolor, P. A. E., Rufino, J. R. Y., Tumarong, M. A. (2019), “Optimized nursery for indoor onion nourishment (ONION)”, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8 (3), 582–586.

[33] Kushawaha, A., Shah, D., Vora, D., Zade, N., Iyer, K. (2024), “Urban small-scale hydroponics: A compact, smart home-based hydroponics system”, *MethodsX*, 13, 102998.

[34] Lal, R. (2024), “Autonomous hydroponic farming using Internet of Things”, 2024 1st International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU), 1–6, Bhubaneswar, India, 01-02 March.

[35] Waghmare, V., Rakte, P., Gadalkar, M., Bhaleghare, S., Sakhare, D., Goudar, M. (2024), “Real time monitoring of hydroponic system using IoT”, 2024 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Applications (ICISAA), 1–6, Pune, India, 25-26 October.

[36] Wang, Y., Zhang, N., Chen, C., Jiang, Y., Liu, T. (2023), “Nonlinear adaptive generalized predictive control for PH model of nutrient solution in plant factory based on ANFIS”, *Processes*, 11 (8), 2317.



ÖZGEÇMİŞ

Tolga Demir, 2016 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi ile mezun olmuştur. Hâlen Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

Profesyonel çalışma hayatını Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde sürdürmekte olup, laboratuvar sorumlusu olarak deney düzeneklerinin hazırlanması, ölçüm sistemlerinin kurulumu ve mühendislik laboratuvar altyapılarının işletilmesi alanlarında görev almaktadır.

Akademik ilgi alanları; gömülü sistemler, nesnelerin interneti (IoT), sensör tabanlı izleme ve kontrol sistemleri, kapalı ortam tarımı ve akıllı hidroponik uygulamalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Yüksek lisans çalışmaları kapsamında, IoT tabanlı kapalı ortam NFT hidroponik sistemlerin tasarımı ve kontrol mimarileri üzerine araştırmalar yürütmektedir.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Demir T., Çiçek İ., (2026) "A Low-Cost and Reliable IoT-Enabled NFT Hydroponics System Using ESP32 and MING Stack,", MDPI Engineering Proceedings, 122(1), 3. (invited paper) doi: 10.3390/engproc2026122003.

